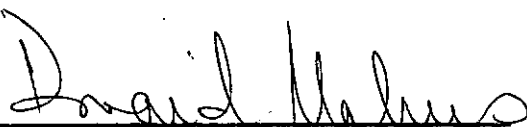


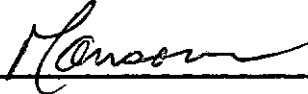
SUSTENTAÇÃO POR PELÍCULA COMPRIMIDA DE GÁS ENTRE
PLACAS EM MOVIMENTO NORMAL RELATIVO

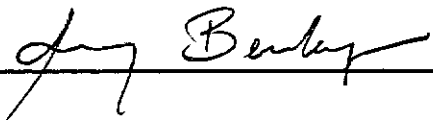
Ney Armando Salaverry

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE
PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JA
NEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA (M.Sc.)

Aprovada por:



Presidente




RIO DE JANEIRO
ESTADO DO RIO DE JANEIRO - BRASIL
SETEMBRO DE 1975

A meus pais e meus irmãos.

A G R A D E C I M E N T O S

Ao CNPq, COPPE / UFRJ e EEUFRJ.

Aos Professores Duraíd Mahrus pela orientação e
Jules Ghislain Slama pelo auxílio no Laboratório.

À Oficina Mecânica da Coppe pela fabricação do dispositivo de teste.

RESUMO

Um dispositivo experimental foi construído para estudar o fenômeno de sustentação devido a efeito de película comprimida de gás.

Uma descrição dos componentes do dispositivo e dos instrumentos necessários para controle e medição é feita.

O efeito da película comprimida sobre o movimento de massa sustentada e a capacidade de carga da película foram investigados sob vários parâmetros de operação.

ABSTRACT

A squeeze bearing experimental device was developed in order to investigate the squeeze film effects.

A description is made of the developed components and the necessary instruments for control and measurements.

Operation parameters were varied and the effects of supported mass motion and load capacity were analysed.

ÍNDICE

CAP. I	-	1.1- INTRODUÇÃO	1
		1.2- HISTÓRICO	3
CAP. II	-	TEORIA	
		2.1- Película lubrificante em cunha convergente	5
		2.2- Equação de Reynolds	7
		2.3- Geometria da película	11
		2.4- Equação de Reynolds em coordenadas polares	12
		2.5- Comportamento isotérmico da película de gás	13
		2.6- Normalização da equação de Reynolds ..	13
		2.7- Condições de contorno	15
		2.8- Soluções	15
CAP. III	-	ANÁLISE TEÓRICA	
		3.1- Análise da película comprimida de gás em função dos parâmetros adimensionais e .	17
		3.2- Força da película através da medida da massa contida	25
CAP. IV	-	TRABALHO EXPERIMENTAL	
		4.1- Dispositivo de testes	28
		4.1.1- Vibrador	34
		4.1.2- Mancal axial de disco	37
		4.1.3- Mancal radial da haste do disco superior	39

4.1.4-	Célula de força	41
4.2-	Equipamento de medição	
4.2.1-	Vibrador	44
4.2.2-	Disco superior	44
4.2.3-	Célula de força	45
4.3-	Roteiro das experiências	
4.3.1-	Escolha das folgas	48
4.3.2-	Ajuste do paralelismo	49
4.3.3-	Testes com o mancal axial de pelícu- la comprimida	51
4.3.3.1-	Amplitudes de deslocamento das su- perfícies	51
4.3.3.2-	Carregamento suportado	52
4.4-	Resultados	54
CAP. V	- CONCLUSÕES E SUGESTÕES	65
	BIBLIOGRAFIA	68
	NOMENCLATURA	70
	APÊNDICE I	72
	APÊNDICE II	75
	APÊNDICE III	81

CAPÍTULO I

1.1- INTRODUÇÃO.

Uma película de gás limitada por duas superfícies submetidas à oscilações normais periódicas de alta frequência, desenvolve uma pressão média por período, entre as superfícies, superior à pressão ambiente. À essa pressão de sustentação, gerada por movimentos normais relativos das superfícies, tendo entre si um fluido compressível, denominamos de efeito de película comprimida, Fig. 1.

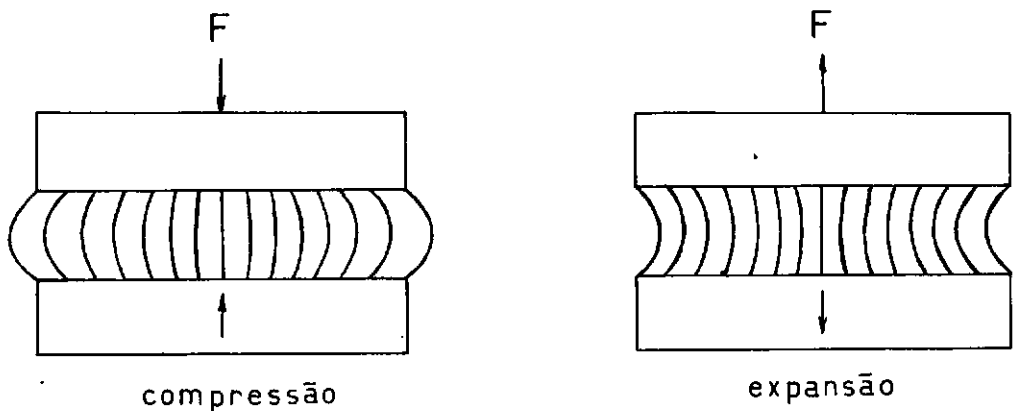


Fig. 1 Película de gás entre duas placas submetidas a movimento normal relativo.

A sustentação é obtida por ação de mola ocasionada por uma pressão média induzida por mecanismo não linear. Esse mecanismo atua combinando os efeitos de uma amplitude finita de oscilação com a compressibilidade do gás, induzindo uma pressão de magnitude e ângulo de fase, em relação ao deslocamento, dependentes da frequência do movimento periódico. Os efeitos de inércia do gás são considerados desprezíveis e o equilíbrio do filme é estabelecido através de um balanço das forças de fluxo viscosas com as forças de compressibilidade. De certo modo, o efeito de película comprimida é um efeito de pressurização interna e sua fonte de compressão são os efeitos não lineares, associados com os movimentos alternados de compressão e expansão da película de gás.

Podemos imaginar a utilização de película comprimida de gás em sistemas de suspensão de baixo coeficiente de atrito, devido à utilização do gás como gerador do efeito hidrodinâmico, quando a velocidade de deslizamento das superfícies fôr muito baixa para gerar uma pressão de película auto-induzida ou a pressurização externa não fôr possível, impedindo assim a utilização desses dois tipos de sistemas de suspensão.

Nosso objetivo aqui foi fazer um estudo experimental e correlações com a teoria, para determinar as características e o comportamento sob carga de uma película comprimida de

gás, limitada por dois discos planos, paralelos e coaxiais, um dos quais está sujeito à uma oscilação senoidal, normal em relação ao outro.

Um dispositivo de testes foi projetado e desenvolvido, com a finalidade de se obter dados de carregamento e espessura de película, assim como de deslocamentos das superfícies, em função de diversas condições de operação e é apresentado em detalhes no presente trabalho.

1.2- HISTÓRICO.

A primeira referência à película comprimida de gás foi feita em um trabalho apresentado por Tipei (2) em 1954.

Uma experiência feita por Reiner (3) em 1956 com uma película comprimida, pretendeu demonstrar o que ele classificou de propriedades não-Newtonianas do ar.

Taylor e Saffman (4) investigaram o efeito do movimento normal relativo entre superfícies de mancal. Na sua análise eles demonstraram que o movimento normal relativo ocasionava o efeito que havia sido atribuído à propriedades não-Newtonianas do ar. A sua conclusão foi de que, sob certas condições, o movimento normal relativo introduz uma pressão média no filme, superior à inicial ou ambiente. Tendo por base a sua análise poder-

se-ia antecipar a possibilidade de operar mancais de película comprimida, nos quais o campo de pressão é desenvolvido pelo movimento normal relativo.

O efeito de sustentação da película comprimida foi demonstrado em laboratório por Salbu (1). Foram apresentados também resultados numéricos para um disco circular, calculados por método de diferenças finitas.

Em nosso trabalho são apresentados resultados experimentais para um disco circular, utilizando valores de rigidez para o filme de gás comparáveis aos de uma película de óleo. Para isso foi necessário utilizar espessuras de película muito pequenas entre 1 e 2 μm .

CAPÍTULO II

TEORIA

2.1- Película lubrificante em cunha convergente

Considere uma superfície em cunha convergente, fixa no espaço, e uma superfície móvel abaixo, com o espaço entre elas preenchido por um fluido lubrificante viscoso, Fig. 2. A espessura do filme em qualquer ponto é h . Na entrada é h_1 e na saída é h_0 . O fluido adjacente à superfície superior tem velocidade zero e a camada adjacente à superfície móvel inferior tem velocidade U .

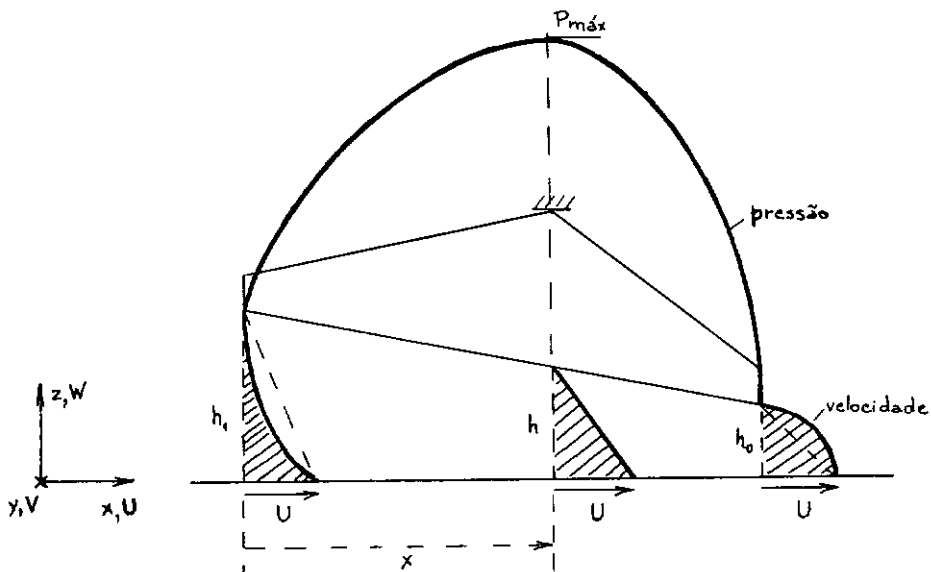


Fig. 2 Perfis de velocidade e pressão

No início do percurso a pressão limita o fluxo, tornando o perfil de velocidades côncavo. No final a pressão força o fluido para fora, aumentando o fluxo e tornando o perfil de velocidades convexo. Consequentemente em um ponto intermediário o perfil de velocidades será linear e isso ocorre no ponto em que a pressão é máxima, equação (2.1.3).

A razão de fluxo por unidade de comprimento contém o termo $Uh/2$, que considera o fluxo como se ele assumisse uma queda linear de velocidades da superfície móvel para a fixa, junto com um termo modificador, que considera o gradiente de pressão (dp/dx), a viscosidade η e a espessura do filme h .

$$q_x = \frac{Uh}{2} - f(p) \quad (2.1.1)$$

Através da análise dimensional (6) determina-se $f(p)$, termo de restrição ao fluxo, que é igual a

$$k \frac{h^3}{\eta} \left(\frac{dp}{dx} \right) \quad (2.1.2)$$

Através de um balanço de forças em um elemento de fluido (6), obtemos o valor de k que é $1/12$.

Logo a razão de fluxo por unidade de comprimento é

$$q_x = \frac{Uh}{2} - \frac{1}{12} \frac{h^3}{\eta} \left(\frac{dp}{dx} \right). \quad (2.1.3)$$

2.2- Equação de Reynolds

Para fluidos compressíveis como os gases, cuja densidade varia com a pressão, a equação de Reynolds que governa a lubrificação hidrodinâmica é obtida através de um balanço do fluxo de massa em uma coluna de fluido de altura h e base dx, dy , Fig.

3.

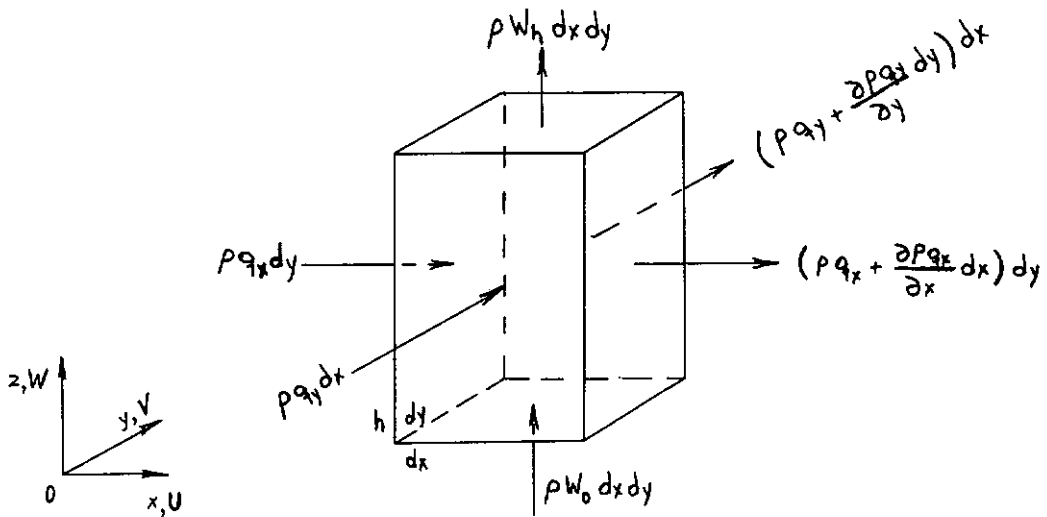


Fig. 3 Continuidade do fluxo de massa em uma coluna

O vazamento líquido na direção x é dado por

$$(p q_x + \frac{\partial p q_x}{\partial x} dx) dy - p q_x dy = \frac{\partial}{\partial x} (p q_x) dx dy \quad (2.2.1)$$

O vazamento líquido na direção y é dado por

$$(p q_y + \frac{\partial p q_y}{\partial y} dy) dx - p q_y dx = \frac{\partial}{\partial y} (p q_y) dy dx \quad (2.2.2)$$

Vazamento líquido total nas direções x,y

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho q_x) dx dy + \frac{\partial}{\partial y} (\rho q_y) dx dy \quad (2.2.3)$$

No caso de superfícies superior e inferior impermeáveis, o que ocorre na direção z é uma variação de massa com o tempo, pela variação da altura h da coluna de fluido.

Variação de massa devido à variação de h

$$\rho (W_h - W_o) dx dy = \rho \frac{dh}{dt} dx dy \quad (2.2.4)$$

Em estado não estacionário a densidade pode mudar com o tempo, logo devemos considerar os efeitos sobre a massa.

Variação de massa devido à variação da densidade

$$h \frac{d\rho}{dt} dx dy \quad (2.2.5)$$

Variação total da massa em z

$$\left(\rho \frac{dh}{dt} + h \frac{d\rho}{dt} \right) dx dy = \frac{d}{dt} (\rho h) dx dy \quad (2.2.6)$$

Para a continuidade do fluxo de massa deveremos ter a soma do vazamento líquido total e da variação de massa igual a zero.

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho q_x) dx dy + \frac{\partial}{\partial y} (\rho q_y) dx dy + \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) dx dy = 0 \quad (2.2.7)$$

Para $dx dy$ arbitrário e diferente de zero, a equação da continuidade se lê

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho q_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho q_y) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) = 0 \quad (2.2.8)$$

A obtenção da equação de Reynolds é feita substituindo-se na equação da continuidade os valores de fluxo por unidade de comprimento.

Fluxo na direção x por unidade de comprimento em y

$$q_x = \frac{Uh}{2} - \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.2.9)$$

Fluxo na direção y por unidade de comprimento em x

$$q_y = \frac{Vh}{2} - \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2.2.10)$$

Substituindo na equação da continuidade temos

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \frac{Uh}{2} - \rho \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \frac{Vh}{2} - \rho \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) = 0 \quad (2.2.11)$$

e a equação de Reynolds geral fica sendo

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3 \rho}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3 \rho}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) \\ & = 6 \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (Uh\rho) + \frac{\partial}{\partial y} (Vh\rho) + 2 \frac{\partial}{\partial t} (h\rho) \right\} \end{aligned} \quad (2.2.12)$$

Simplificações:

Admitindo velocidades somente na direção x

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \frac{V_h}{2} \right) = 0 \quad (2.2.13)$$

Como a velocidade da superfície não varia de um ponto do mancal para outro, U não é função de x

$$\frac{\partial}{\partial x} (U h \rho) = U \frac{\partial}{\partial x} (h \rho) \quad (2.2.14)$$

Substituindo na equação geral de Reynolds e admitindo o fluido isoviscoso temos

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \rho \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \rho \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\eta \left\{ U \frac{\partial}{\partial x} (h \rho) + 2 \frac{\partial}{\partial t} (h \rho) \right\} \quad (2.2.15)$$

Os termos do lado esquerdo consideram a variação da pressão nas direções x e y respectivamente. No lado direito, o primeiro termo considera a pressão gerada por efeito de cunha e o segundo a pressão gerada por efeito do movimento normal relativo entre as superfícies que limitam a película lubrificante.

Uma simplificação adicional é feita quando as duas superfícies que limitam a película são paralelas e nesse caso

$$U \frac{\partial}{\partial x} (h \rho) = 0 \quad (2.2.16)$$

Substituindo (2.2.16) em (2.2.15) temos a equação de Reynolds simplificada:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \rho \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \rho \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 12\eta \frac{\partial}{\partial t} (h\rho) \quad (2.2.17)$$

2.3- Geometria da película

Para simplificar a solução numérica considera-se, - no caso de mancal constituído de dois discos, o disco superior estacionário e o inferior oscilando senoidalmente em torno de uma folga média h_0 , em direção normal às superfícies, com uma amplitude de oscilação δh e frequência ω , Fig. 4.

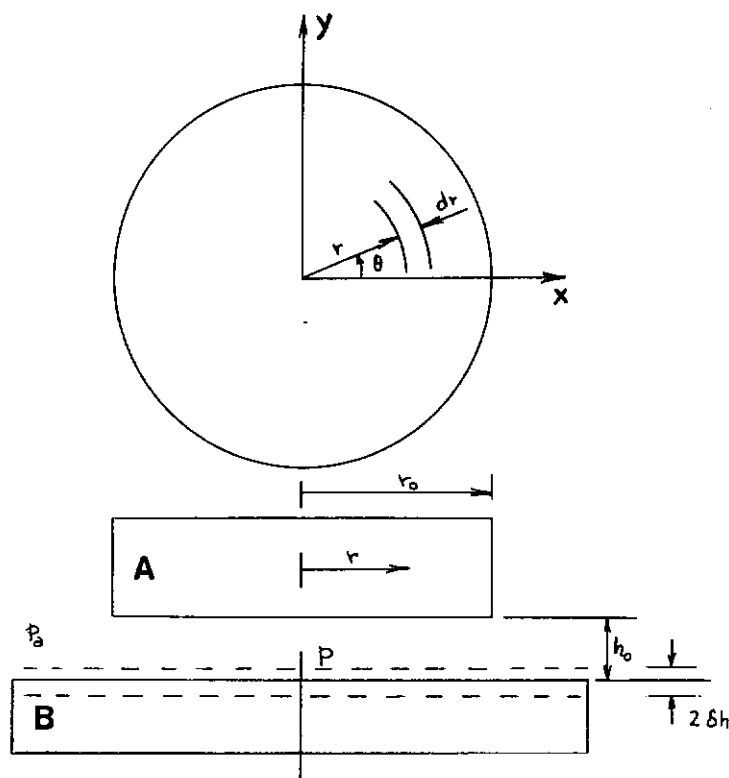


Fig. 4 Geometria do mancal de disco. A) Disco superior. B) Disco inferior.

Logo, o espaço entre os discos é

$$h = h_0 - \delta h \cos \omega t \quad (2.3.1)$$

Normalizando em relação a h_0 , o espaço entre os discos pode ser descrito por

$$H = 1 - \epsilon \cos \omega t = 1 - \epsilon \cos T \quad (2.3.2)$$

aonde $\epsilon = \delta h / h_0$, a excursão, é a medida da maior mudança de volumes e $0 \leq \epsilon \leq 1$.

2.4- Equação de Reynolds em coordenadas polares

Nesse trabalho, as superfícies que limitam a película lubrificante são planas e circulares, sendo conveniente o uso da equação de Reynolds em coordenadas polares.

Da figura 4:

$$x = r \cos \theta$$

$$y = r \sin \theta$$

E a equação (2.2.17) se torna:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(h^3 \rho r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(h^3 \rho \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = 12\eta \frac{\partial}{\partial t} (h\rho) \quad (2.4.1)$$

Simplificações:

No caso de discos circulares o perfil de pressão é

simétrico e consequentemente p não varia com θ , logo

$$\frac{\partial p}{\partial \theta} = 0 \quad (2.4.2)$$

Para superfícies paralelas, o valor de h não varia com r , logo podemos escrever a equação de Reynolds do seguinte modo

$$\frac{h^3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho \frac{\partial p}{\partial r} \right) = 12 \eta \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) \quad (2.4.3)$$

2.5- Comportamento isotérmico da película de gás

Para os gases $p v^n = \text{constante}$

Tomando o comportamento da película como sendo isotérmico, temos $n = 1$ e p proporcional a ρ , permitindo que a equação de Reynolds seja escrita

$$\frac{h^3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r p \frac{\partial p}{\partial r} \right) = 12 \eta \frac{\partial}{\partial t} (p h) \quad (2.5.1)$$

2.6- Normalização da equação de Reynolds

É conveniente a normalização da equação de Reynolds através da definição de parâmetros adimensionais.

São definidos os seguintes parâmetros:

$$R = \frac{r}{r_0}, \quad P = \frac{p}{p_a}, \quad H = \frac{h}{h_0}, \quad T = \omega t \quad (2.6.1)$$

onde

r_0 = raio da superfície suportada

p_a = pressão ambiente

h_0 = distância média entre as superfícies

ω = frequência circular de oscilação

Substituindo esses valores em (2.5.1), teremos a equação de Reynolds normalizada

$$\frac{H^3}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(P R \frac{\partial P}{\partial R} \right) = \sigma \frac{\partial}{\partial T} (P H) \quad (2.6.2)$$

onde

$$\sigma = \frac{12\eta\omega r_0^2}{p_a h_0^2} = n^\circ \text{ de película comprimida}$$

Deduzimos da análise dessa equação que no caso de discos paralelos, planos e coaxiais, onde não haja recessos em u ma ou ambas as superfícies, a pressão é função de R , H , T e σ . Logo a rotação em torno do eixo comum não introduz nenhum campo de pressão.

Desse modo, através das equações (2.3.2) e (2.6.2), as características do filme estão definidas pelos parâmetros adi mensionais σ , n° de película comprimida e ϵ , excursão.

2.7- Condições de contorno

Para uma completa definição do problema, as condições de contorno são

$P = 1$ quando $T = 0$, isto é, a pressão inicial entre os discos é p_a .

$P = 1$ quando $R = 1$, isto é, a pressão na periferia é constante e igual a p_a .

$\frac{\partial P}{\partial R} = 0$ quando $R = 0$, isto é, a pressão é máxima no centro do disco.

2.8- Soluções

Soluções aproximadas da equação (2.6.2) por método de diferenças finitas foram obtidas por Salbu (1), assumindo o movimento normal relativo descrito por (2.3.2), obtendo-se

a) Pressão ao longo do raio em função do tempo:

$$P = \frac{p}{p_a} = f(R, T, \sigma, \epsilon) \quad (2.8.1)$$

b) Força total do filme exercida nos discos (carregamento) em função do tempo:

$$W(T) = \frac{F}{p_a r_o^2} = f'(T, \sigma, \epsilon) \quad (2.8.2)$$

Sabemos que

$$F = 2\pi \int_0^{r_0} (p - p_a) r dr \quad (2.8.3)$$

Utilizando parâmetros adimensionais em lugar de p e r , temos

$$F = 2\pi p_a r_0^2 \int_0^1 (P-1) R dR \quad (2.8.4)$$

e

$$W(T) = \frac{F}{p_a r_0^2} = 2\pi \int_0^1 (P-1) R dR \quad (2.8.5)$$

c) Força média do filme exercida nos discos (carregamento médio):

$$W_n = \frac{F_n}{p_a r_0^2} = f''(\sigma, \epsilon) \quad (2.8.6)$$

$$W_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} W(T) dT \quad (2.8.7)$$

CAPÍTULO III

ANÁLISE TEÓRICA

Salbu (1) desenvolveu uma análise baseada em dados numéricos para um mancal axial constituído de dois discos paralelos, planos e coaxiais, em função da variação do número de película e da excursão.

3.1- Análise da película comprimida de gás em função dos parâmetros adimensionais σ e ϵ .

Com números de película, σ , baixos (isto é, frequência baixa, ω , ou folga grande, h_0), o ar é forçado para fora à medida em que a folga diminui e aspirado quando a folga aumenta.

Fluxo radial ocorre em toda a extensão da película desde que as forças viscosas, opondo-se ao fluxo, sendo proporcionais a ω , são pequenas, equação (3.1.2).

Temos

$$\tau = \eta \frac{dU}{dz} \quad (3.1.1)$$

$$dU = \frac{dh}{dt}$$

$$dz = dh_0$$

Consequentemente

$$\tau = \eta \frac{\frac{dh}{dt}}{dh_0} \sim \eta \frac{d}{dt} \left(\frac{h}{h_0} \right) = \eta \frac{d}{dt} (1 - \epsilon \cos \omega t)$$

$$\tau = \eta \omega \epsilon \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.1.2)$$

A pressão e consequentemente a força sobre as superfícies dos discos são proporcionais à velocidade de compressão da película, dh/dt , antes de ser ao deslocamento e por conseguinte guiam esse deslocamento. Definindo o ângulo de fase ϕ entre a força normal e o deslocamento, como o ângulo entre
 $H_{\min} = 1 - \epsilon$ e $W(T)_{\max}$, vemos que quando $\sigma \rightarrow 0$, $\phi \rightarrow \pi/2$.

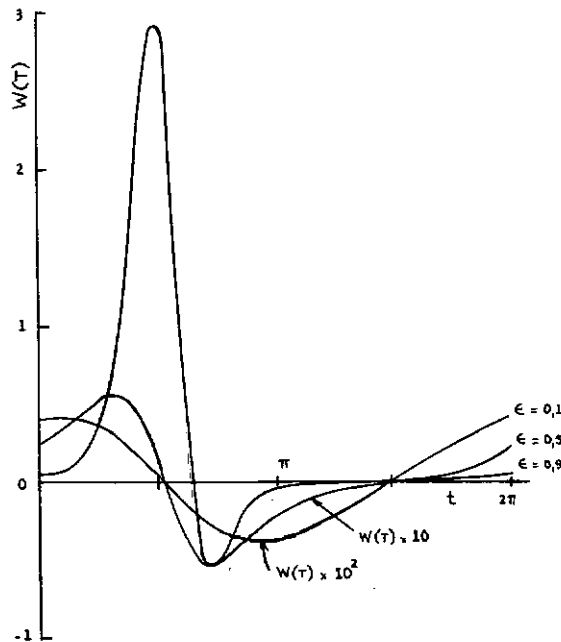


Fig. 5 Perfil de força entre discos planos, paralelos. $H = 1 - \epsilon \sin \omega t$, $\sigma = 0,1$.

Na Fig. 5, vemos que quando a excursão aumenta as forças viscosas que se opõem ao fluxo aumentam, introduzindo efeitos de compressibilidade, particularmente quando as folgas são muito pequenas, que tornam os perfis de pressão assimétricos.

À medida em que ω , e consequentemente σ , aumentam as forças viscosas opondo-se ao fluxo aumentam.

Na região central do disco a resistência ao fluxo será bastante alta para introduzir efeitos de compressibilidade, isto é, o gás será comprimido e expandido alternadamente com o movimento dos discos em vez de ser forçado para fora e para dentro. As forças de compressibilidade são proporcionais ao deslocamento e estão consequentemente em fase com $H = 1 - \epsilon \cos \omega t$.

A película de ar representa agora uma combinação de forças de atenuação viscosa e ação de mola. O ângulo de fase se torna menor e a pressão e a força se tornam mais assimétricas, Fig. 6.

No limite, quando $\sigma \rightarrow \infty$, o fluxo somente ocorre em uma região estreita da periferia, enquanto que a compressibilidade prevalece no resto do filme.

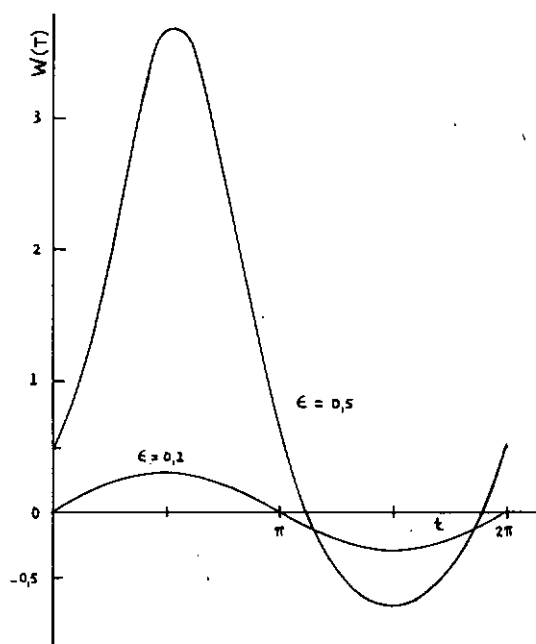


Fig. 6 Perfil de força entre discos planos, paralelos. $H = 1 - \epsilon \sin \omega t$, $\sigma = 1\,000$.

Aproximando, com números de película comprimida, σ , muito grandes nenhum fluxo ocorre e a operação se assemelha à de um pistão dentro de um cilindro fechado. Assim é permissível usar a lei de Boyle para descrever a pressão agindo nos discos, equação (3.1.3).

$$p v = \text{constante} \quad (3.1.3)$$

Ainda que isso seja contra as condições de contorno, porque introduz uma descontinuidade no perfil de pressão, descreve bem o comportamento hipotético da película dentro da borda do disco e mostra porque o efeito de mancal ocorre.

Assim, assumindo temperatura constante, temos:

$$\frac{p}{p_0} \frac{v}{v_0} = 1$$

ou $PV = 1$, quando $p_0 = p_a$. (3.1.4)

Pressão e volume iniciais p_0 , $v_0 = \pi r_0^2 h_0$

Pressão e volume instantâneos p , $v = v_0 (1 - \epsilon \cos \omega t)$

Temos $p = p_0 \frac{1}{\frac{v}{v_0}}$.

Logo $p = \frac{p_0}{1 - \epsilon \cos \omega t}$. (3.1.5)

e $P = \frac{p}{p_0} = \frac{1}{1 - \epsilon \cos \omega t}$. (3.1.6)

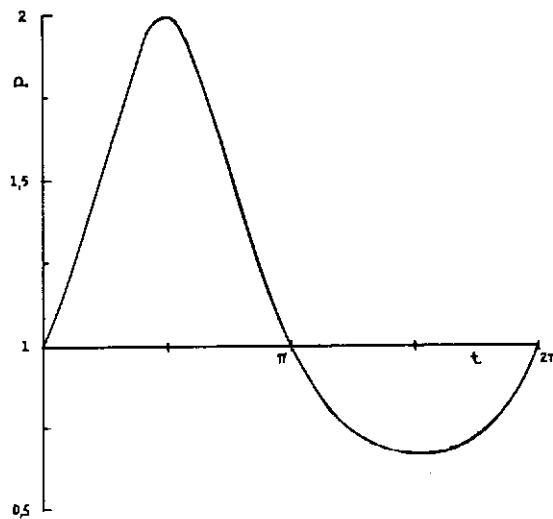


Fig. 7 Perfil de pressão calculado pela lei de Boyle. $H = 1 - 0,5 \sin \omega t$.

O perfil de pressão calculado pela equação (3.1.6) com $\epsilon = 0,5$ é mostrado na Fig. 7. O perfil é assimétrico, com o superambiente máximo aproximadamente três vezes superior ao subambiente mínimo, mostrando que para valores de σ grandes, os efeitos de compressibilidade irão resultar em uma força líquida positiva no filme que pode representar um efeito de mancal.

Os perfis de pressão obtidos da solução numérica da equação (2.6.2) mostram os mesmos efeitos do modelo simplificado baseado na lei de Boyle.

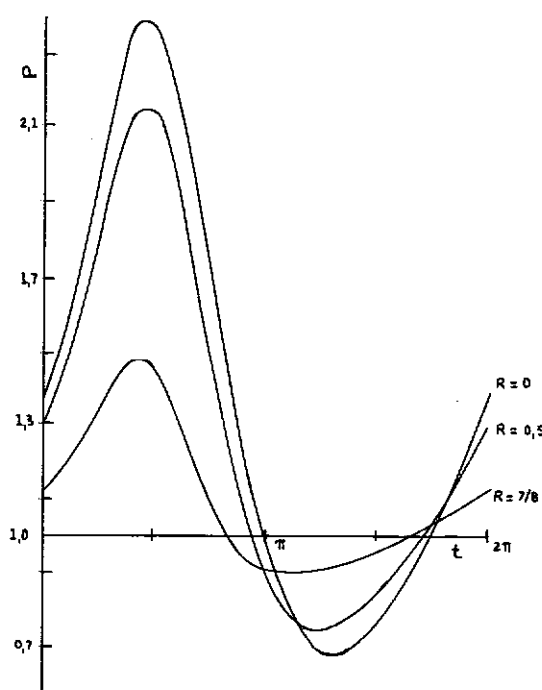


Fig. 8 Perfil de pressão entre discos planos, paralelos. $H = 1 - 0,5 \text{ sen } \omega t$, $\sigma = 10$.

A Fig. 8 mostra que a pressão é máxima, mais assimétrica e apresenta o menor desvio de fase ϕ em torno de $R=0$, indicando efeitos de compressibilidade mais pronunciados nessa região. Efeitos de fluxo prevalecem na região periférica, indicados pelo perfil mais simétrico, com maiores ângulos de fase e menores amplitudes. A Fig. 9, com $\sigma=1000$, mostra perfis de pressão quase coincidentes para valores menores do que $R=7/8$, indicando que os efeitos de compressibilidade prevalecem na maior parte do filme enquanto os efeitos de fluxo se restringem à região periférica, evidenciado pela pressão em $R=15/16$.

Comparando os perfis de pressão da Fig. 7 e Fig. 9, vemos que o da Fig. 7, baseado em $p v = c$, mostra $P_{\text{máx}} = 2$ e $P_{\text{mín}} = 0,67$, enquanto os valores computados da Fig. 9 são $P_{\text{máx}} = 2,35$ e $P_{\text{mín}} = 0,74$. A pressão inicial, em $H=1$, na Fig. 9, é ligeiramente superior à atmosférica, sendo seu valor aproximadamente igual a 1,15 ao invés de 1.

O aumento na pressão inicial parece ser devido a efeito de borda, pois nessa região a pressão lidera o deslocamento por aproximadamente $\pi/2$ e está por conseguinte no seu máximo quando a pressão interior deveria ser igual a atmosférica. Entretanto, para existir equilíbrio no filme, uma pressão interior transiente ocorre na região interior até que a pressão interior contrabalance as forças de fluxo nas bordas.

Se nós usarmos a lei de Boyle sujeita à condições i niciais, $PV = 1,15$, veremos que os resultados obtidos são $P_{\text{máx}} = 2,3$ e $P_{\text{mín}} = 0,76$, aproximadamente iguais aos computados da Fig. 9.

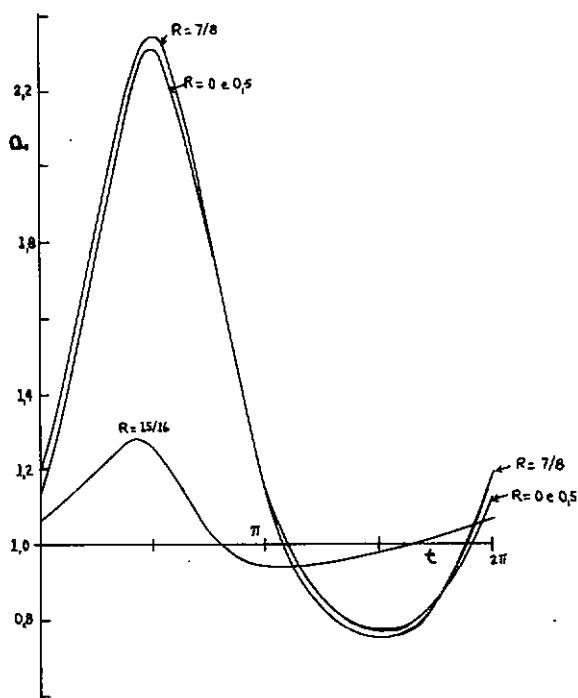


Fig. 9 Perfil de pressão entre discos planos, paralelos. $H = 1 - 0,5 \sin \omega t$, $\sigma = 1000$.

3.2- Força da película através da medida da massa contida(1)

Considerando a medida da massa contida na película, por um período de 2π , da equação (2.6.2) vem:

$$\int_0^{2\pi} \frac{H^3}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(P R \frac{\partial P}{\partial R} \right) dT = \sigma \int_0^{2\pi} \frac{\partial}{\partial T} (PH) dT = 0,$$

por causa da periodicidade. (3.2.1)

$$\int_0^{2\pi} PH^3 R \frac{\partial P}{\partial R} dT = \text{constante}$$

$$\int_0^{2\pi} PH^3 \frac{\partial P}{\partial R} dT = \frac{\text{constante}}{R}$$

Como $\frac{\partial P}{\partial R} = 0$ em $R=0$, temos que constante = 0

ou

$$\int_0^{2\pi} P^2 H^3 dT = \text{constante}$$

Em $R=1$, $P=1$, temos:

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} P^2 H^3 dT &= \int_0^{2\pi} H^3 dT \\ &= \int_0^{2\pi} (1 - \epsilon \cos T)^3 dT \\ &= 2\pi \left(1 + \frac{3}{2} \epsilon^2 \right) \end{aligned}$$

Logo, a medida da massa contida no caso de película comprimida, finita e infinita, do tipo estudado é expressa como

$$\int_0^{2\pi} P^2 H^3 dT = 2\pi \left(1 + \frac{3}{2} \epsilon^2\right) \quad (3.2.2)$$

Para números de película comprimida muito altos, o que equivale à lei de Boyle com uma condição inicial não especificada, podemos usar a equação (3.2.2) para encontrar a solução da equação de Reynolds (2.6.2).

Na equação (2.6.2), para $\sigma \rightarrow \infty$ o termo do lado esquerdo só se mantém finito se

$$\frac{\partial}{\partial T} (PH) = 0$$

Desse modo

$$PH = \text{constante} = A \quad (3.2.3)$$

Das equações (3.2.2) e (3.2.3) vem

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} P^2 H^3 dT &= A^2 \int_0^{2\pi} H dT = 2\pi A^2 \\ &= 2\pi \left(1 + \frac{3}{2} \epsilon^2\right) \end{aligned}$$

$$\therefore P = \frac{A}{(1 - \epsilon \cos T)}, \text{ com } A = \left(1 + \frac{3}{2} \epsilon^2\right)^{1/2} \quad (3.2.4)$$

Fazendo $\epsilon = 0,5$ na equação (3.2.4) temos :

$$A = 1,1726$$

$$P_{\text{máx}} = 2,345$$

$$P_{\text{mín}} = 0,781$$

A força total da película como função do tempo é :

$$W(T) = \frac{F}{p_a r_o^2} = \pi (P - 1)$$

$$W(T) = \pi \left[\frac{\left(1 + \frac{3}{2} \epsilon^2\right)^{1/2}}{1 - \epsilon \cos T} - 1 \right] \quad (3.2.5)$$

A força média da película é :

$$W_n = \frac{F_n}{p_a r_o^2} = \pi \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} W(T) dT \right]$$

$$W_n = \pi \left[\left(\frac{1 + \frac{3}{2} \epsilon^2}{1 - \epsilon^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (3.2.6)$$

CAPÍTULO IV

TRABALHO EXPERIMENTAL

4.1- Dispositivo de testes

Foi projetado e desenvolvido um dispositivo para testar o efeito de sustentação de película comprimida, agindo entre dois discos paralelos, planos e coaxiais, Fig. 10. Nesse dispositivo, os dois discos se movimentam segundo movimentos normais relativos, sendo que o superior é livre e o inferior é acionado por um vibrador. O disco superior é um plano ótico de quartzo e o inferior é um disco de aço inoxidável fixado à mesa de um vibrador piezoelétrico.

Para se obter rigidez lateral no movimento normal do disco superior, foi cimentado a ele, de topo, um eixo radialmente suportado por um mancal a ar externamente pressurizado. Esse tipo de mancal foi escolhido por assegurar um movimento axial com atrito desprezível, não interferindo assim no movimento do disco superior, Fig. 11.

A força de sustentação da película e o deslocamento do disco sustentado por ela são medidos, respectivamente, por u-

ma célula de força e um transdutor capacitivo de deslocamento, na extremidade superior do eixo ligado ao disco superior. A célula de força, constituída por um anel metálico com strain gages colados, é calibrada para cargas atuantes nela e funciona também como mola na aplicação de esforços ao disco superior e à película de gás. Isso é conseguido por meio de um parafuso fixado à estrutura de testes, que ao ser acionado comprime o anel metálico e este transmite a força de compressão ao eixo ligado ao disco superior, Fig. 12.

O posicionamento da folga inicial do disco superior em relação ao inferior é feito por um comparador eletrônico. Modificações na posição do disco superior, durante o funcionamento, também são detectadas pelo comparador, permitindo corrigir a sensibilidade usada para o cálculo das amplitudes de oscilação do disco superior dadas pelo transdutor capacitivo, que é de folga variável e sensibilidade variando proporcionalmente.

O deslocamento do disco inferior é controlado por um acelerômetro cimentado em sua superfície.

O dispositivo possui uma estrutura rígida de aço, constituída de uma base e um conjunto superior sustentado por três hastes. Esse conjunto é constituído de uma placa circular e uma armação para abrigar a célula de força. Essa placa possui

três orifícios em sua periferia, por onde passam as extremidades roscadas das hastes suportes fixadas na base e um furo central, onde se adapta o mancal a ar que suporta a haste do disco superior. Porcas de latão fixam, aos pares, o conjunto superior nas hastes e permitem variar a sua inclinação em relação ao plano da superfície do disco inferior para o ajuste do paralelismo dos discos.

Devido ao alto nível de intensidade sonora emitido pelo vibrador - aproximadamente 95 db em 6 000 Hz - parte do dispositivo foi fechado no interior de uma caixa de madeira forrada internamente com lã de vidro e espuma de nylon, ficando exposta apenas a parte superior do dispositivo de testes. Com isso a intensidade foi reduzida em aproximadamente 15 db.

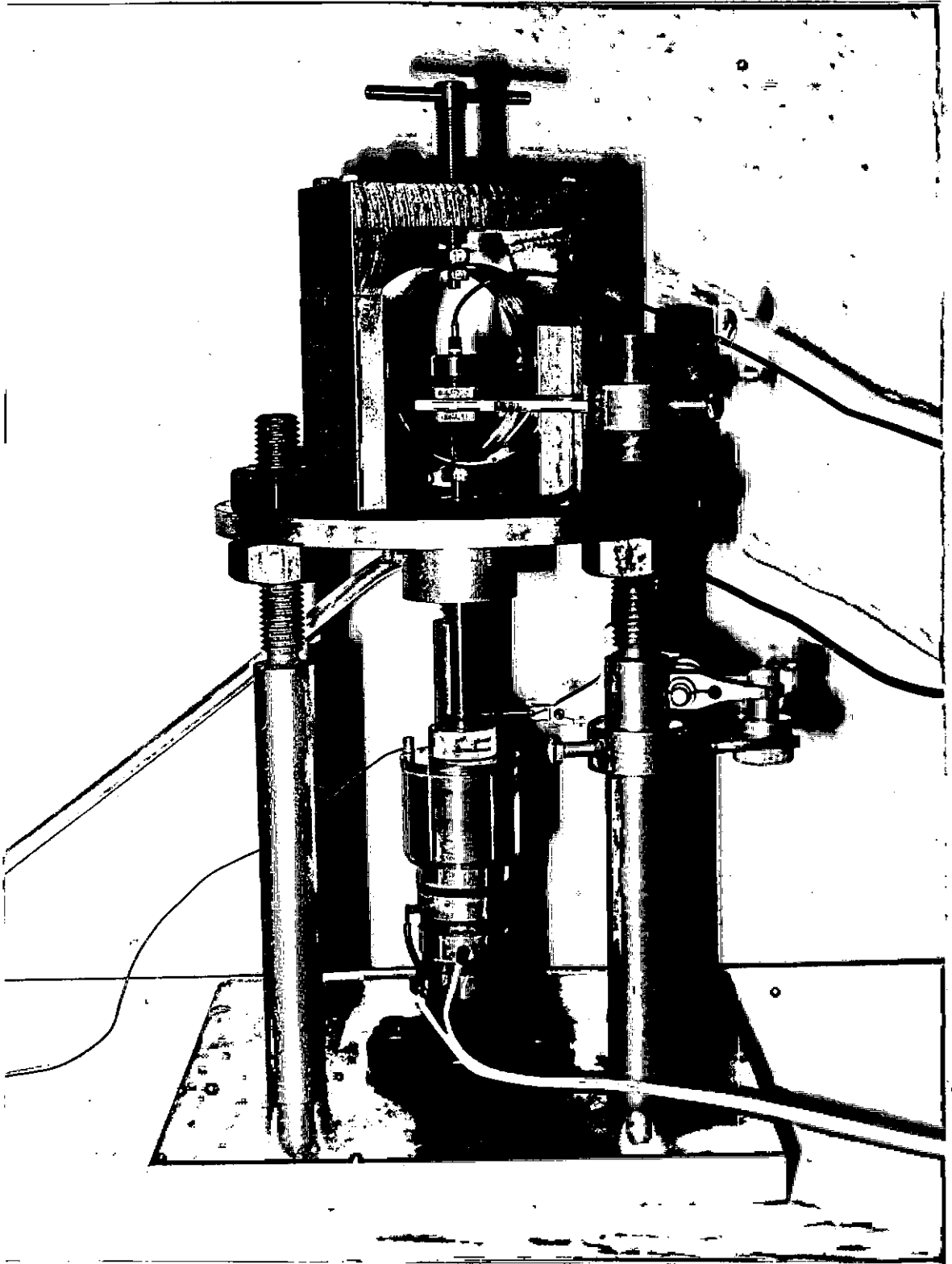


Fig. 10 Dispositivo de testes

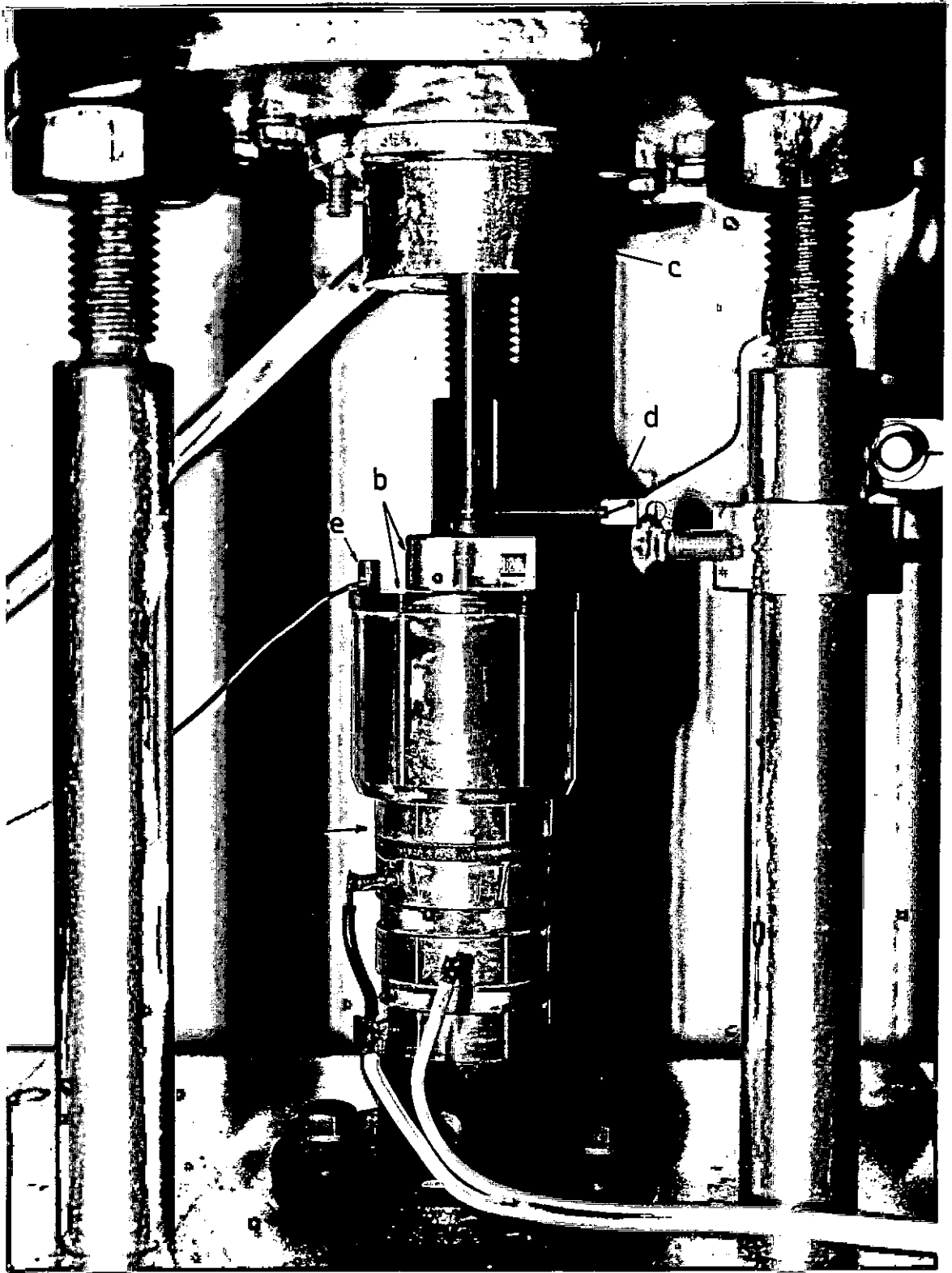


Fig.11 Dispositivo de testes - parte inferior. (a) Vibrador, (b) mancal de película comprimida, (c) mancal radial a ar, (d) comparador eletrônico, (e) acelerômetro

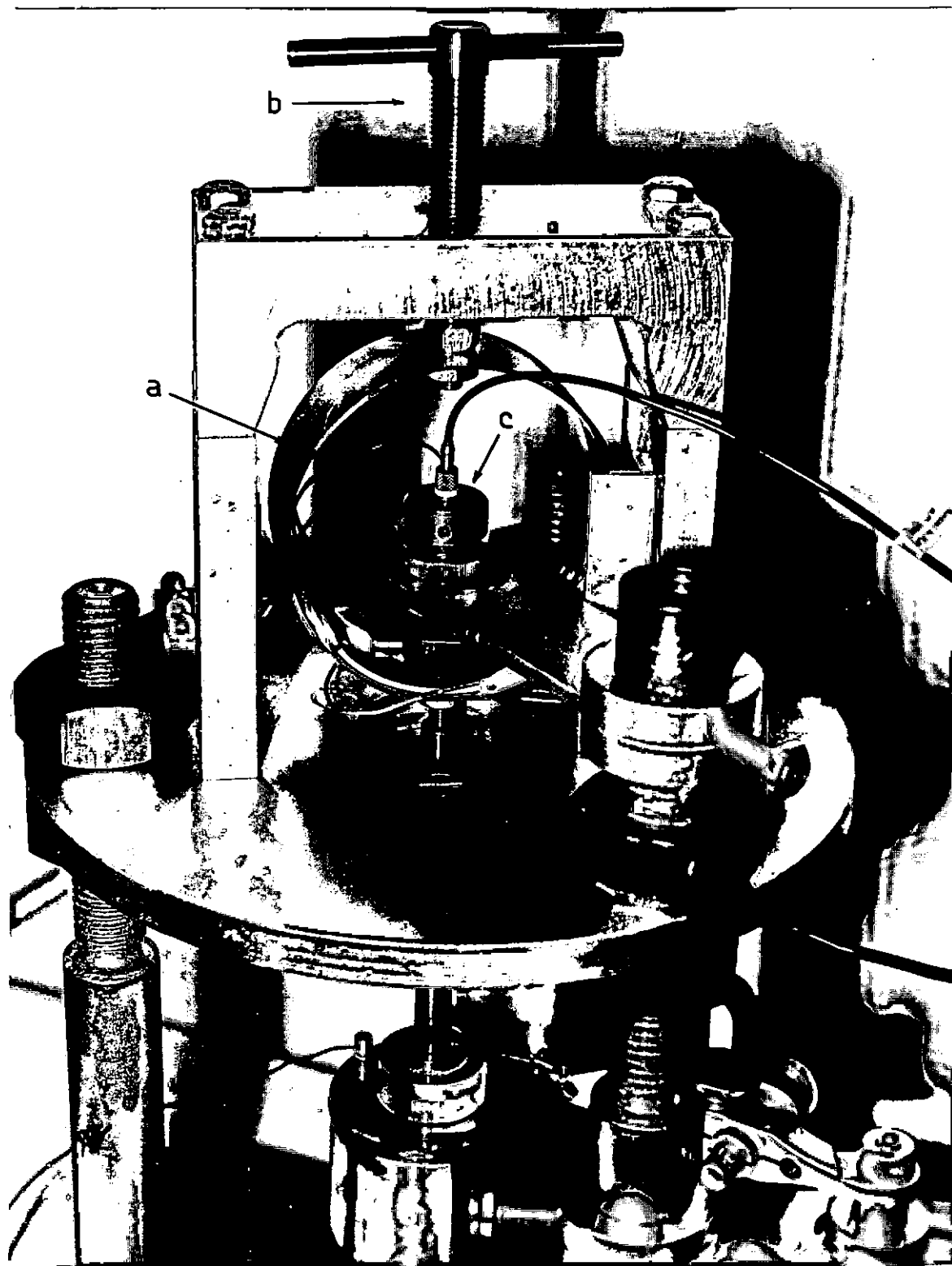


Fig.12 Dispositivo de testes - parte superior. (a) Célula de força, (b) parafuso de carga, (c) transdutor de deslocamento

4.1.1- Vibrador

Foi projetado e desenvolvido um gerador eletrodinâmico piezoelétrico (vibrador) para atuar como fonte do movimento normal relativo, gerador do efeito de película comprimida, Fig. 13, referências (9),(10) e (11).

O elemento vibrante é uma barra de alumínio de 10,6 cm, que é o comprimento de um quarto de onda no alumínio para a frequência de ressonância escolhida de 12000 Hz, fixada em uma base de aço.

Usando o princípio do sanduiche piezoelétrico para aumentar a amplitude, dois discos cerâmicos de titano zirconato de chumbo (PZT4) foram inseridos na barra de alumínio e acionam o vibrador quando é aplicada voltagem alternada às suas faces. Cada cerâmica tem uma espessura de 0,635 cm e um diâm. de 3,9 cm.

O vibrador tem um diâmetro de 5 cm na mesa e 4 cm no corpo. Esse acréscimo de diâmetro na mesa foi feito para permitir a fixação de um acelerômetro de monitoração do deslocamento.

Um disco plano de aço inoxidável, temperado, retificado e polido até o espelhamento, de 5 cm de diâmetro e 0,4 cm de espessura, foi cimentado na extremidade superior do vibrador e funciona como superfície limitadora inferior da película comprimida de gás.

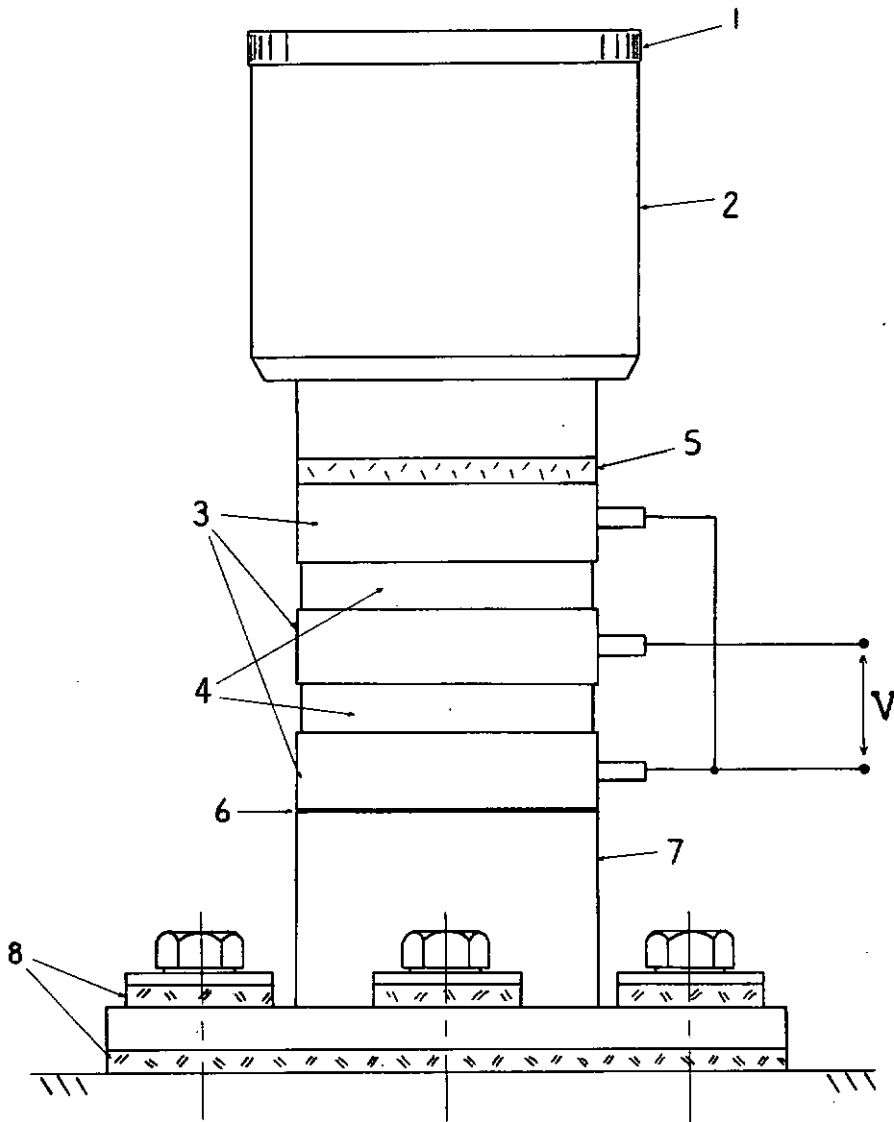


Fig. 13 Vibrador. (1) Disco acionador da película comprimida (aço inóx.), (2) massa (alumínio), (3) eletrodos (alumínio), (4) cerâmicas (PZT4), (5) isolador (acrílico), (6) cimento epoxi (espessura de 0,2 mm), (7) base (aço) e (8) isoladores (celeron).

O vibrador está eletricamente isolado da estrutura de testes por meio de uma placa de celeron em sua base e buchas do mesmo material nos quatro parafusos que o ligam à base da estrutura de testes.

Para não afetar o funcionamento do acelerômetro de monitoração das amplitudes de deslocamento do disco inferior, a parte central do vibrador, onde estão as cerâmicas e os eletrodos, foi isolada da extremidade, onde está o acelerômetro, por meio de um disco de acrílico.

Todas as partes componentes do vibrador foram unidas por um adesivo de cianoacrilato (Loctite IS 12).

O sistema de acionamento eletrônico é constituído de um amplificador de potência de 350 watts (McIntosh modelo 3500 A), que recebe o sinal de entrada de um oscilador (Hewlett-Packard modelo 200 CD).

O casamento das impedâncias do vibrador (1100Ω) e do amplificador de potência (64Ω) é feito por meio de um transformador inserido entre os dois com relação de espiras igual a

$$\frac{N_f}{N_c} = \sqrt{\frac{Z_f}{Z_c}} = \sqrt{\frac{64}{1100}} = \frac{1}{4,15} ,$$

onde as letras f e c se referem respectivamente a fonte (amplificador) e a carga (vibrador), e Z é a impedância.

4.1.2- Mancal axial de disco

Como superfície limitadora superior da película de gás e consequentemente superfície suportada pelo efeito de película comprimida, foi utilizado um plano ótico circular de quartzo. As vantagens dessa escolha são as características mecânicas do quartzo como dureza alta e peso específico baixo, aliadas à planicidade e à possibilidade de um ajuste de paralelismo utilizando fonte de luz monocromática. As dimensões do plano ótico são - 30 mm de diâmetro e 12,120 mm de espessura.

Cimentada de topo no disco ótico, uma haste de aço inoxidável com um mancal radial externamente pressurizado fornece rigidez lateral ao mancal de disco. Essa haste possui na sua extremidade superior um trecho roscado e duas porcas para fixação na célula de força.

A medição do deslocamento axial do conjunto é feita por um transdutor capacitivo de deslocamento que utiliza como superfície de medição a face plana, não vazada, da porca que, dentro do anel, fixa a haste na célula de força.

O conjunto placa-haste-porcas tem um peso de 115 g e é mostrado na Fig. 14.

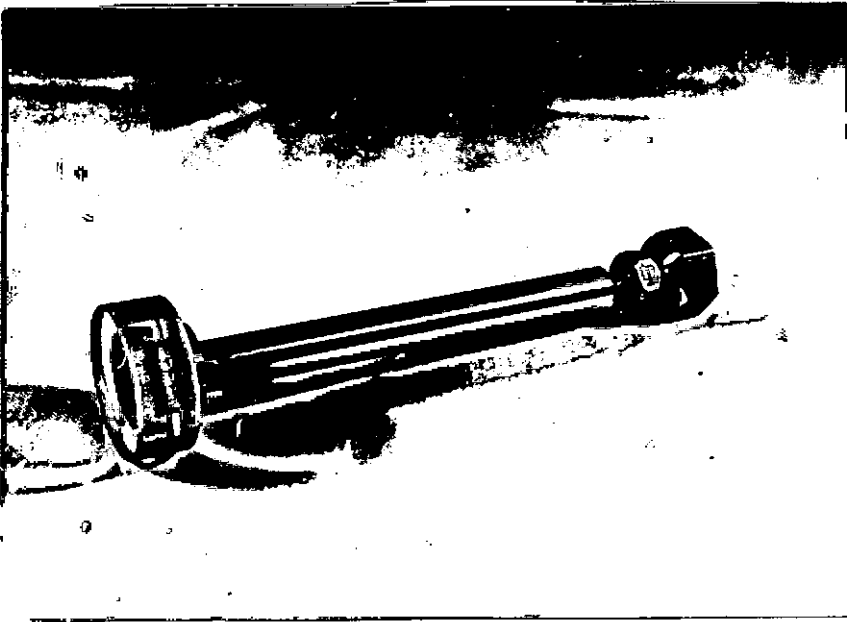


Fig. 14 Conjunto superior do
mancal axial de disco.

4.1.3- Mancal radial da haste do disco superior

Para sustentar lateralmente o conjunto superior do mancal axial de disco foi utilizado um mancal radial a ar, externamente pressurizado, Fig.15. Sua posição no dispositivo de testes é central, na parte de baixo do conjunto superior da estrutura.

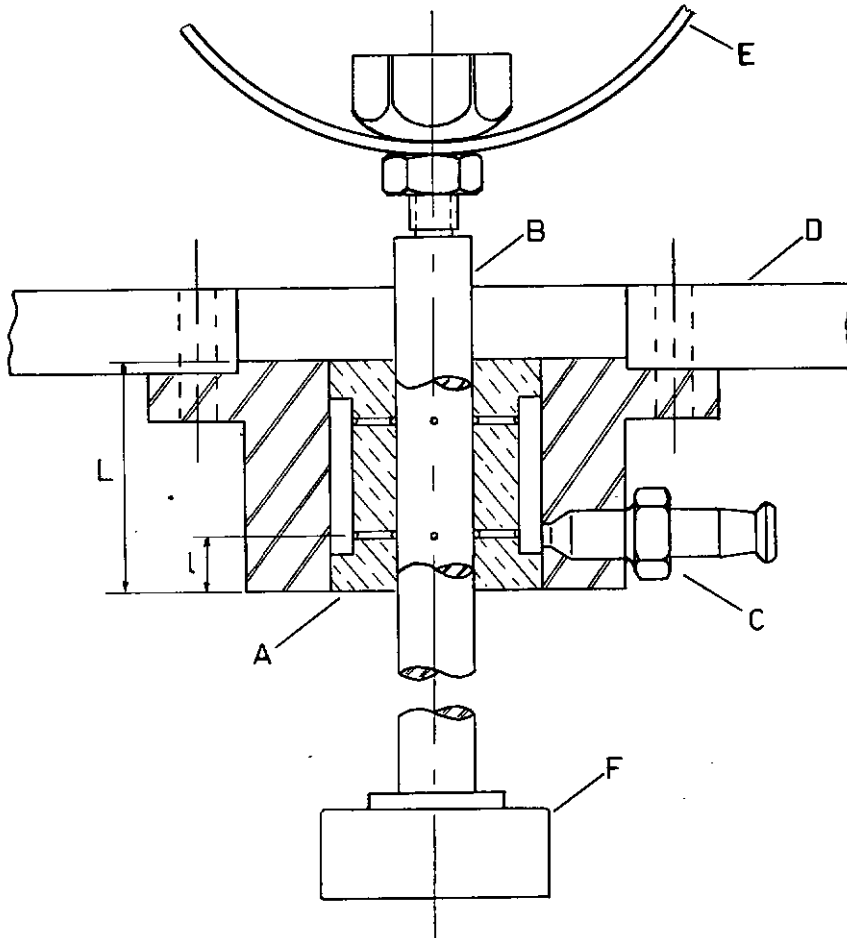


Fig.15 Seção do mancal radial. (A) Mancal, (B) haste, (C) alimentador de ar, (D) estrutura, (E) célula de força e (F) mancal de disco.

Os seguintes parâmetros foram utilizados no projeto do mancal (7):

Mancal a ar para o conjunto superior do mancal de disco

Folga diametral $C = 0,05 \text{ mm}$

Duas linhas de orifícios com 4 orifícios/linha

Fator de pressão $K_{g0} = 0,4$

Pressão de suprimento $p_0 = 50 \text{ psi}$

Diâmetro dos orifícios $d = 0,5 \text{ mm}$

Diâmetro interno $D = 10 \text{ mm}$

Relação comprimento/diâmetro $L/D = 3$

Comprimento $L = 30 \text{ mm}$

Posicionamento das linhas de orifícios em relação ao comprimento total $\ell/L = 1/4$

Comprimento $\ell = 7,5 \text{ mm}$

Como fonte de suprimento de ar foi usado um compressor de vazão regulável (marca Dabí - compressor de equipamento dentário).

4.1.4- Célula de força

Na medição do carregamento e como meio de submeter a película de gás a diferentes cargas de teste foi utilizado um transdutor elástico (8), constituído de um elemento elástico em forma de anel utilizando extensômetros de resistência elétrica (strain gages), colados, como transdutores secundários, Fig. 16.

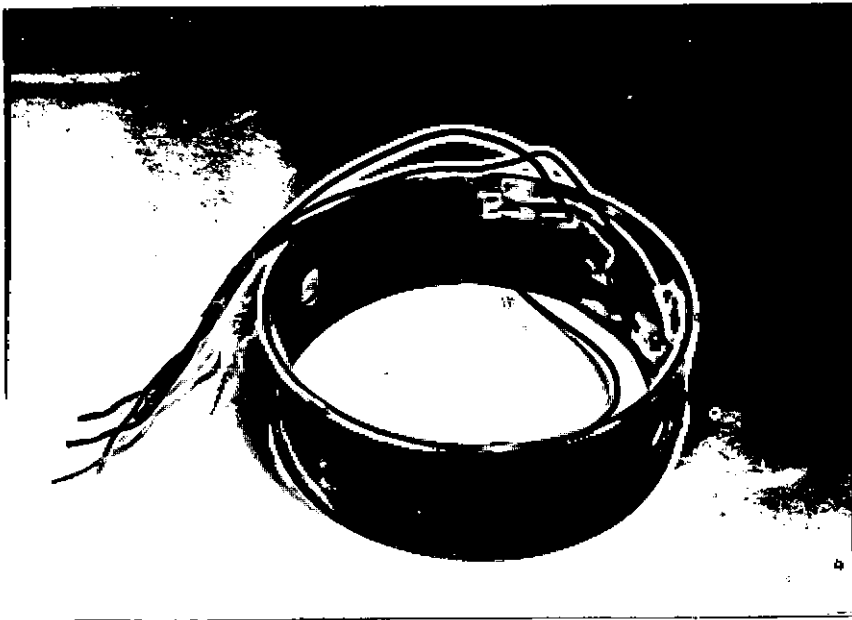


Fig. 16 Célula de força

O anel da célula é de aço inoxidável e os extensômetros são do tipo fio, de um elemento (Philips 9833K/06FE, resistência de $120,5\Omega$ e fator de sensibilidade $K = 2,06$). Na colagem dos extensômetros foi usado um cimento epoxi rápido (Cascopox).

A disposição dos extensômetros utilizada no anel permite detectar componentes de flexão através de R_1, R_2, R_3 e R_4 e axiais através de R_1 e R_4 , Fig. 17.

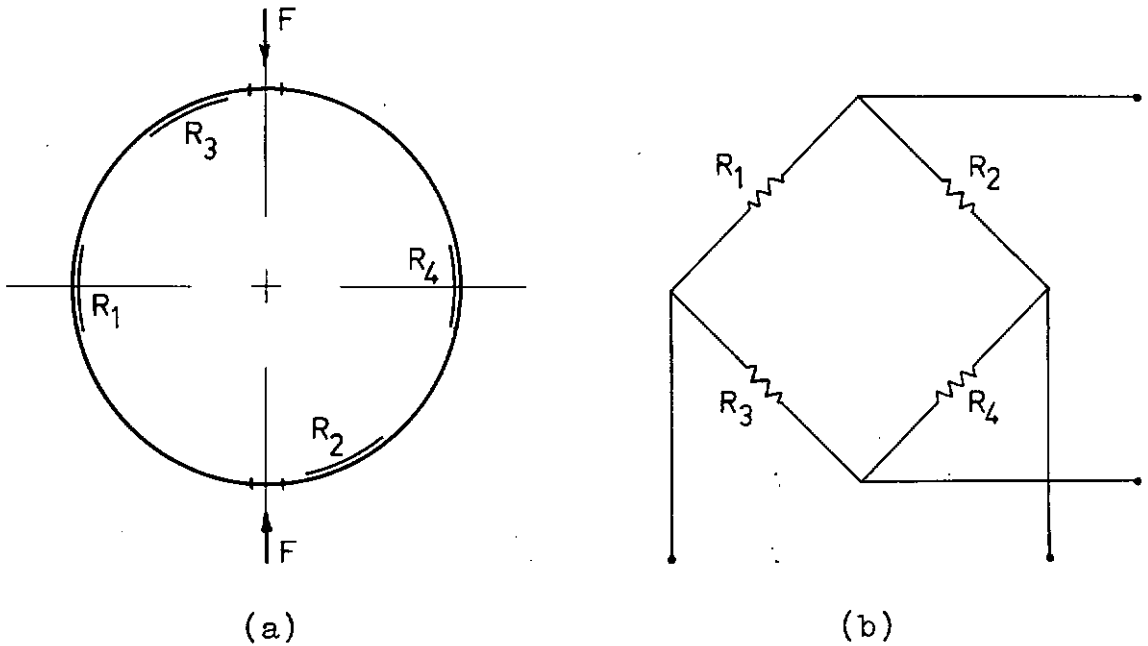


Fig. 17 Disposição dos extensômetros no anel (a) e na ponte (b).

Foram construídas duas células de força de capacidade complementares, de modo que os anéis trabalhem sempre em regime elástico, dividindo a utilização pela faixa de esforços estimada por resultados teóricos prévios. Ambos os anéis têm mesmas medidas de comprimento e diâmetro interno - 30 mm e 82 mm respectivamente - e diferentes espessuras - 0,9 e 1,2 mm.

Para a fixação na haste do disco superior e no parafuso de compressão foram feitos dois orifícios diametralmente o-postos no anel elástico da célula, de 6,5 mm de diâmetro.

O sistema de acionamento eletrônico da célula é composto de um amplificador portador acoplado à um osciloscópio (especificados no item 4.2).

Os anéis foram calibrados (ver Apêndice I) para se estabelecer a correspondência da leitura do osciloscópio dada em microstrain (microunid./unid.) para kgf.

4.2- Equipamento de medição

4.2.1- Vibrador

O controle da voltagem de acionamento do vibrador é feito por um Voltímetro de tubo a vácuo (Simpson mod. 312) ligado na saída do transformador de acoplamento.

A frequência de acionamento do vibrador é controlada por um Counter (General Radio tipo 1191) ligado na saída do oscilador, cuja frequência de saída não é mostrada de modo preciso pelo dial.

A amplitude de deslocamento da extremidade do vibrador é controlada por um acelerômetro (B & K tipo 8307). A saída do acelerômetro é conectada à um Pre-Amplificador (B & K tipo ... 2625) e este à um Voltímetro RMS (HP tipo 3400A): O deslocamento pode ser calculado a partir da aceleração pela equação:

$$\text{deslocamento} = \frac{\text{aceleração}}{\omega^2}$$

4.2.2- Disco superior

O deslocamento do conjunto do disco superior é medido por dois meios. A posição inicial em relação ao disco inferior é medida por um Electronic Gage (Starrett tipo 712) com uma sensibilidade de 10 micropolegadas e uma força de contato no braço

ço apalpador de 8-12 gramas. A amplitude de oscilação é medida por um Transdutor Capacitivo (B & K tipo MM 0004) de folga variável em conjunto com um Cathode Follower (B & K tipo 2615) e um Measuring Amplifier (B & K tipo 2606).

A determinação do ângulo de fase dos deslocamentos é feita em um Osciloscópio (Tektronix tipo 564 B).

4.2.3- Célula de força

O condicionamento do sinal da ponte de extensômetros da célula de força é feito por uma unidade Carrier Amplifier (Tektronix tipo 3C66) acoplada ao osciloscópio.

Um esquema das ligações e uma fotografia de conjunto dos equipamentos de medição e de acionamento do vibrador são mostrados nas Figs. 18 e 19.

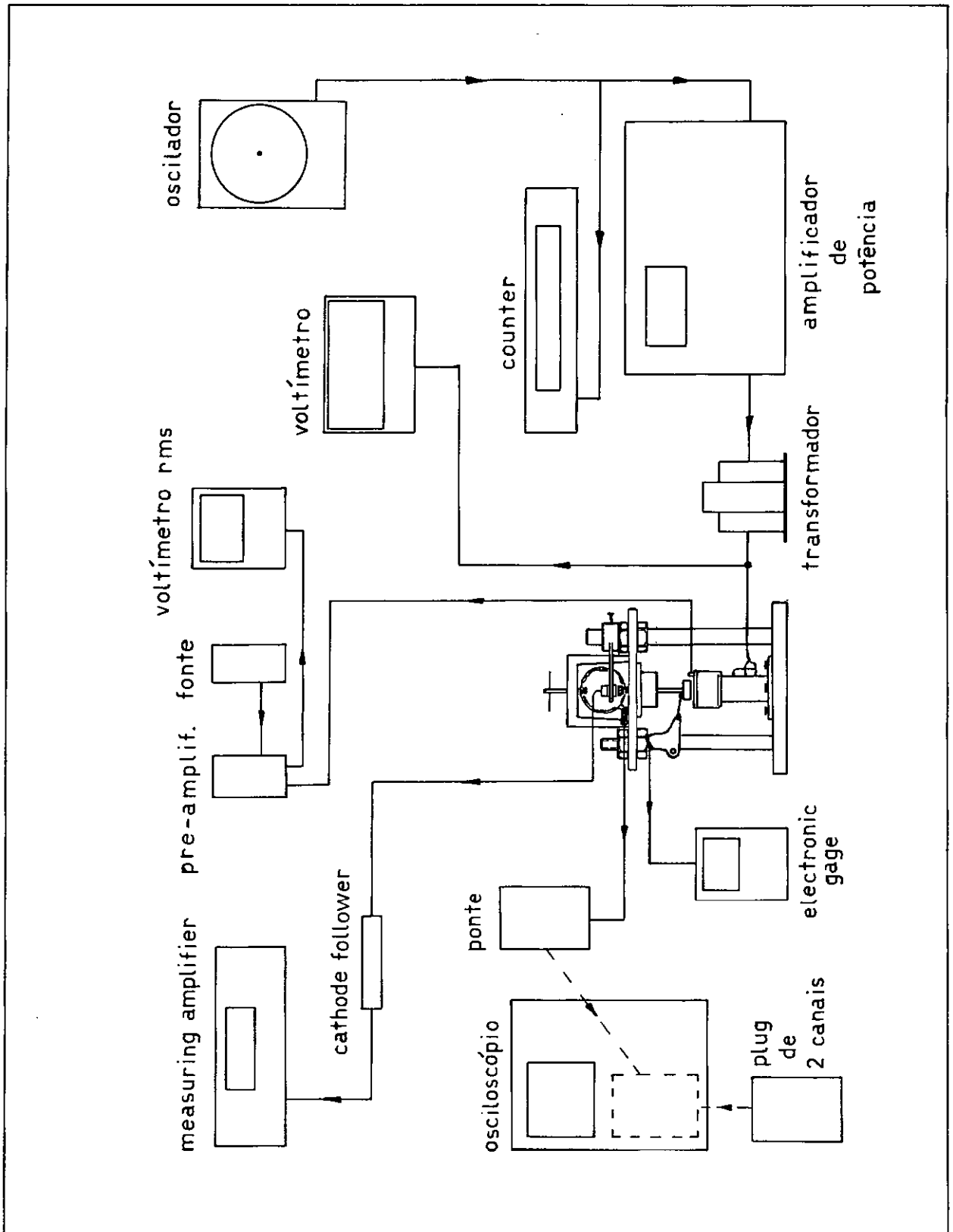


Fig.18 Disposição esquemática dos aparelhos de medição e de acionamento do vibrador.

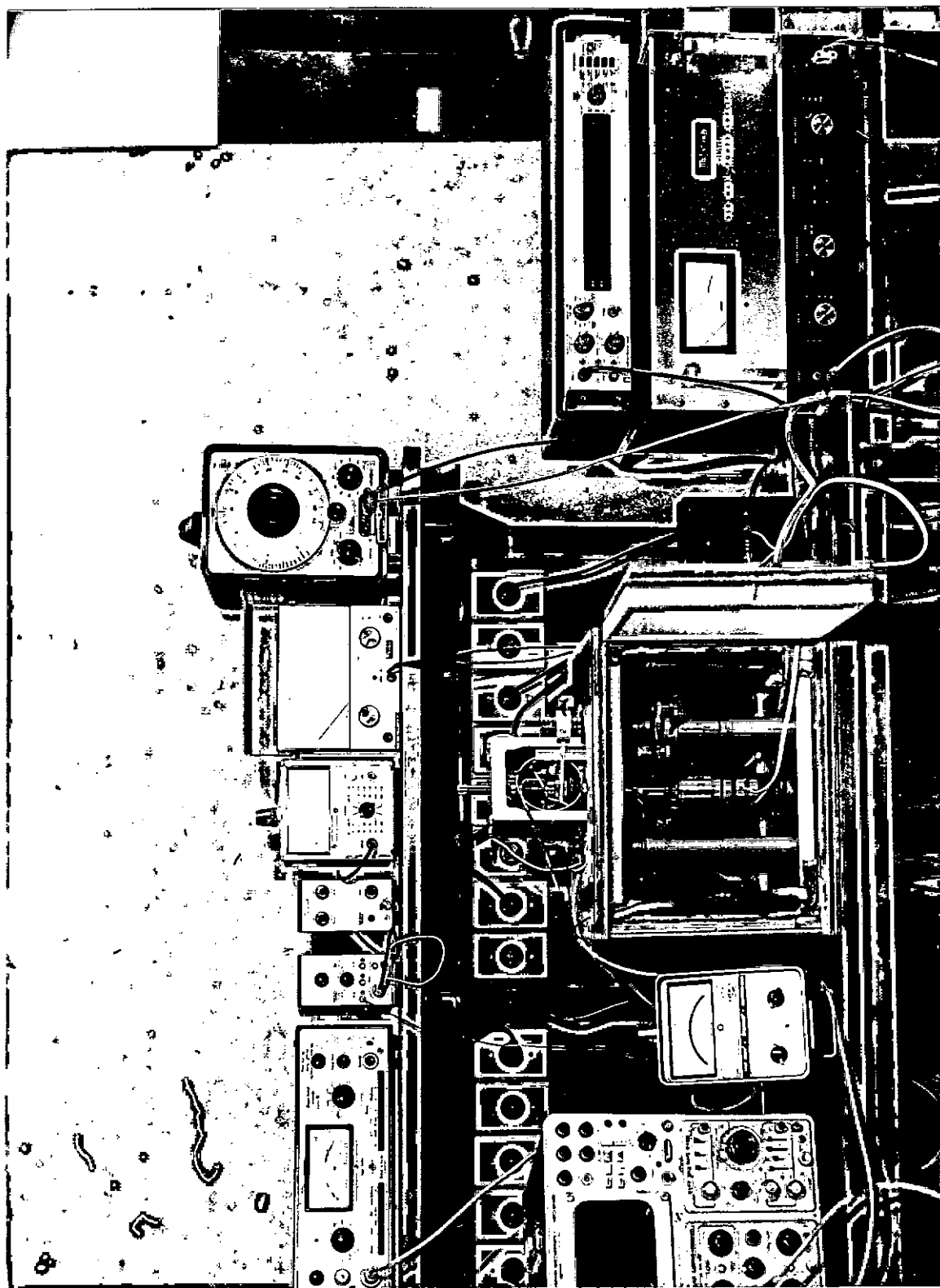


Fig.19 Aparelhos de medição e de acionamento.

4.3- Roteiro das experiências

Uma explicação é dada a seguir sobre a escolha da folga do mancal axial de película comprimida, ajustes preliminares de paralelismo entre as superfícies, tipos e condições das experiências realizadas.

4.3.1- Escolha das folgas

Em experiência anterior Salbu (1) utilizou folgas compreendidas entre 0,0025 e 0,05 mm.

Em nosso trabalho procuramos usar folgas que dessem à película lubrificante de gás uma rigidez comparável à de um filme de óleo. Sabemos que a rigidez de um filme lubrificante é proporcional à viscosidade e inversamente proporcional ao quadrado da folga. Ou:

$$\text{rigidez} \propto \frac{\text{viscosidade}}{(\text{folga})^2}$$

Em um mancal comum a óleo poderemos ter viscosidades que se aproximam de 2,75 poises e folgas de 0,25 mm são típicas. Com um gás entretanto, viscosidades 15000 vezes menores ocorrem. Para que tenhamos rigidez comparável deveremos ter, para uma viscosidade de $1,8 \times 10^{-4}$ poises, folgas de 0,002 mm e menores.

Baseando-nos nesse critério de escolha decidimos o-

perar o mancal com folga média, h_0 , entre 0,001 mm (40 micropolegadas) e 0,002 mm (80 micropolegadas).

4.3.2- Ajuste do paralelismo

No ajuste do paralelismo entre as superfícies dos discos que constituem o mancal axial de película comprimida foi usado um método que utiliza para medição um comparador eletrônico (electronic gage).

Inicialmente o dispositivo de medição (gage head) do comparador é fixado na extremidade de uma das hastes. A seguir o apalpador (lever) é posto em contato com a extremidade do conjunto do disco superior, Fig. 20.

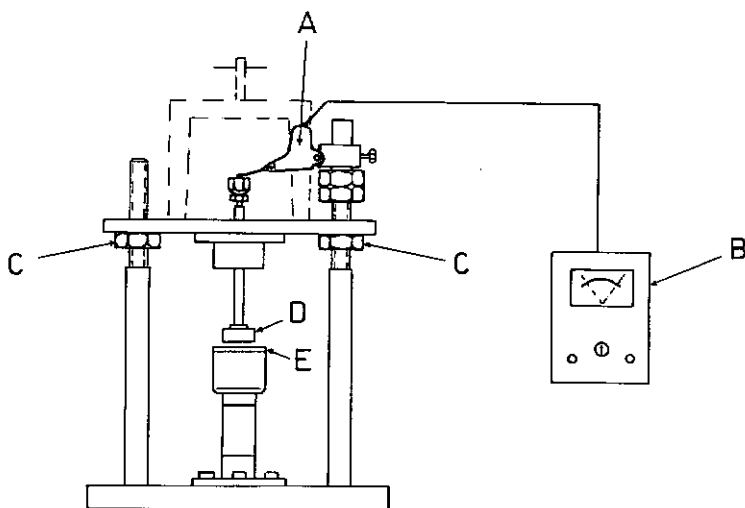


Fig. 20 Ajuste do paralelismo. (A) gage head, (B) electronic gage, (C) porcas de ajuste, (D) disco superior e (E) disco inferior.

Por meio das porcas de fixação, variando-se a inclinação do conjunto superior da estrutura de testes, procuramos a posição mais baixa do ponto de medição. Nessa situação o melhor alinhamento é obtido, Fig. 21.

Admitindo-se que uma variação da ordem de 3,5 micropolegadas não é detectada pelo comparador, o alinhamento estático obtido por esse método está dentro de 7 micropolegadas.

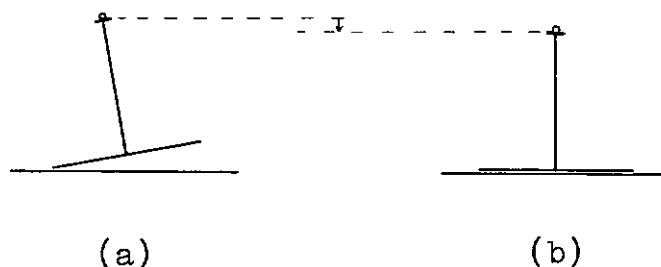


Fig. 21 Alinhamento. (a) leitura inicial.
(b) leitura final mínima (superf. paral.)

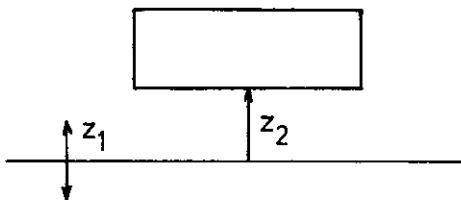
4.3.3- Testes com o mancal axial de película comprimida

4.3.3.1- Amplitudes de deslocamento das superfícies

Foram feitas medições das amplitudes de deslocamento das superfícies do mancal com o disco superior livre (sem a célula de força), sustentado lateralmente pelo mancal a ar externamente pressurizado da haste.

O procedimento consiste em acionar o vibrador com amplitudes crescentes e inicialmente com os discos em contato e à medida em que a sustentação seja obtida computar os valores das amplitudes dos deslocamentos das superfícies.

Os deslocamentos dos discos inferior e superior são dados por:



$$z_1 = \delta h_1 \cos \omega t \quad (4.3.1)$$

$$z_2 = h_0 + \delta h_2 \cos (\omega t + \theta) \quad (4.3.2)$$

Foram feitas curvas $\delta h_2 / \delta h_1$ versus δh_1 para as frequências de ressonância do vibrador (Apêndice II).

4.3.3.2- Carregamento suportado

A análise teórica mostrou que a capacidade de carga do mancal axial de película comprimida pode ser expressa em função dos parâmetros adimensionais σ e ϵ .

Para valores de σ superiores a 100, referência (1), essa capacidade varia mais com ϵ do que com σ . Desse modo foram obtidas curvas de carregamento suportado, W_n , versus excursão, ϵ , para determinados valores de σ função da espessura de película e das frequências escolhidas.

Os valores de σ foram calculados pela equação :

$$\sigma = \frac{12 \eta \omega r_o^2}{p_a h_o^2} ,$$

onde $\omega = 2\pi f$.

Para manter σ constante em cada curva de carregamento, ω , frequência circular e h_o , espessura média da película, foram mantidos constantes.

As medidas de carregamento foram feitas quando h_o atingiu 0,0015 mm (60 μ in).

Como a superfície superior sustentada pela película não é estacionária, os valores da excursão foram obtidos variando-se δh_1 , amplitude da superfície inferior, porém considerando

δh_2 e θ , amplitude da placa superior e ângulo de fase entre os deslocamentos inferior e superior respectivamente.

A excursão total, ϵ , é calculada, referência (5), pela equação:

$$\epsilon^2 = \epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 - 2 \epsilon_1 \epsilon_2 \cos \theta \quad (4.3.3)$$

onde
$$\epsilon_1 = \frac{\delta h_1}{h_0}$$

e
$$\epsilon_2 = \frac{\delta h_2}{h_0} .$$

As condições mantidas constantes durante os testes foram:

$$T = 23 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\eta = 1,8 \times 10^{-4} \text{ poises}$$

$$r_0 = 1,45 \text{ cm}$$

$$p_a = 1,013 \times 10^6 \text{ dina/cm}^2 = 1,033 \text{ kgf/cm}^2$$

$$h_0 = 1,5 \times 10^{-4} \text{ cm} = 60 \text{ } \mu\text{in}$$

Os valores do carregamento suportado são obtidos da célula de força e calculados pela equação:

$$W_n = \frac{F_n}{p_a r_0^2} = \frac{F_n}{2,172} \quad (4.3.4)$$

onde W_n = carregamento suportado (adimensional)
 F_n = força média por ciclo (kgf)
 p_a = pressão ambiente (kgf/cm²)
 r_0 = raio do disco sustentado (cm).

4.4- Resultados

Nos testes executados para determinar as amplitudes de deslocamento das superfícies, a única força aplicada sobre a placa superior é a da própria massa do conjunto, num total de 0,115 kg. Foram usadas as três frequências de ressonância do conjunto vibrador (1600 Hz, 6700 Hz e 10900 Hz) cuja geração necessita uma diferença de potencial relativamente baixa, Gráfico II.1 (Apêndice II).

Usando uma frequência de 1600 Hz, Gráfico I, e variando a amplitude do sinal de entrada para o vibrador, aumenta o valor médio da amplitude δh_1 de vibração da placa inferior.

A placa superior separa-se da inferior por efeito da película comprimida quando a amplitude de vibração alcança um valor relativamente baixo, $\delta h_1 = 0,06 \mu\text{m}$. Este ponto de levantamento pode ser detectado tanto no transdutor de deslocamento como acusticamente. Esta tendência continua com a frequência de 6700 Hz, porém, com 10900 Hz a amplitude necessária até o levantamento da placa superior é de $\delta h_1 = 0,1 \mu\text{m}$.

Após o levantamento a placa superior ganha em amplitude muito rapidamente, alcançando valores superiores a duas vezes os da placa inferior que são da ordem de $0,1 \mu\text{m}$ com 1600 Hz ou 6700 Hz e $0,15 \mu\text{m}$ com 10900 Hz. Esta relação se mantém cons-

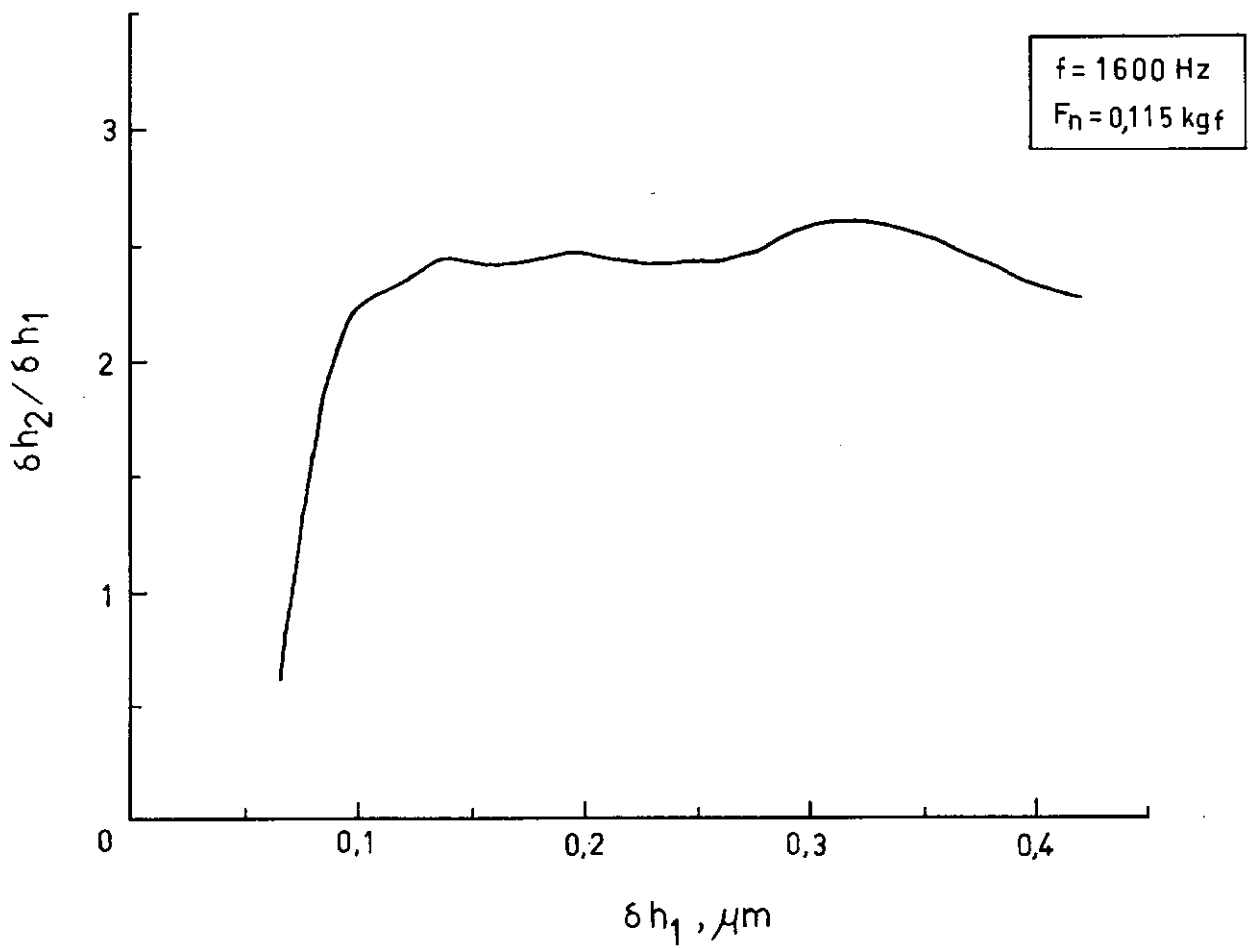


Gráfico I. Razão das amplitudes das placas superior e inferior versus amplitude da placa inferior.

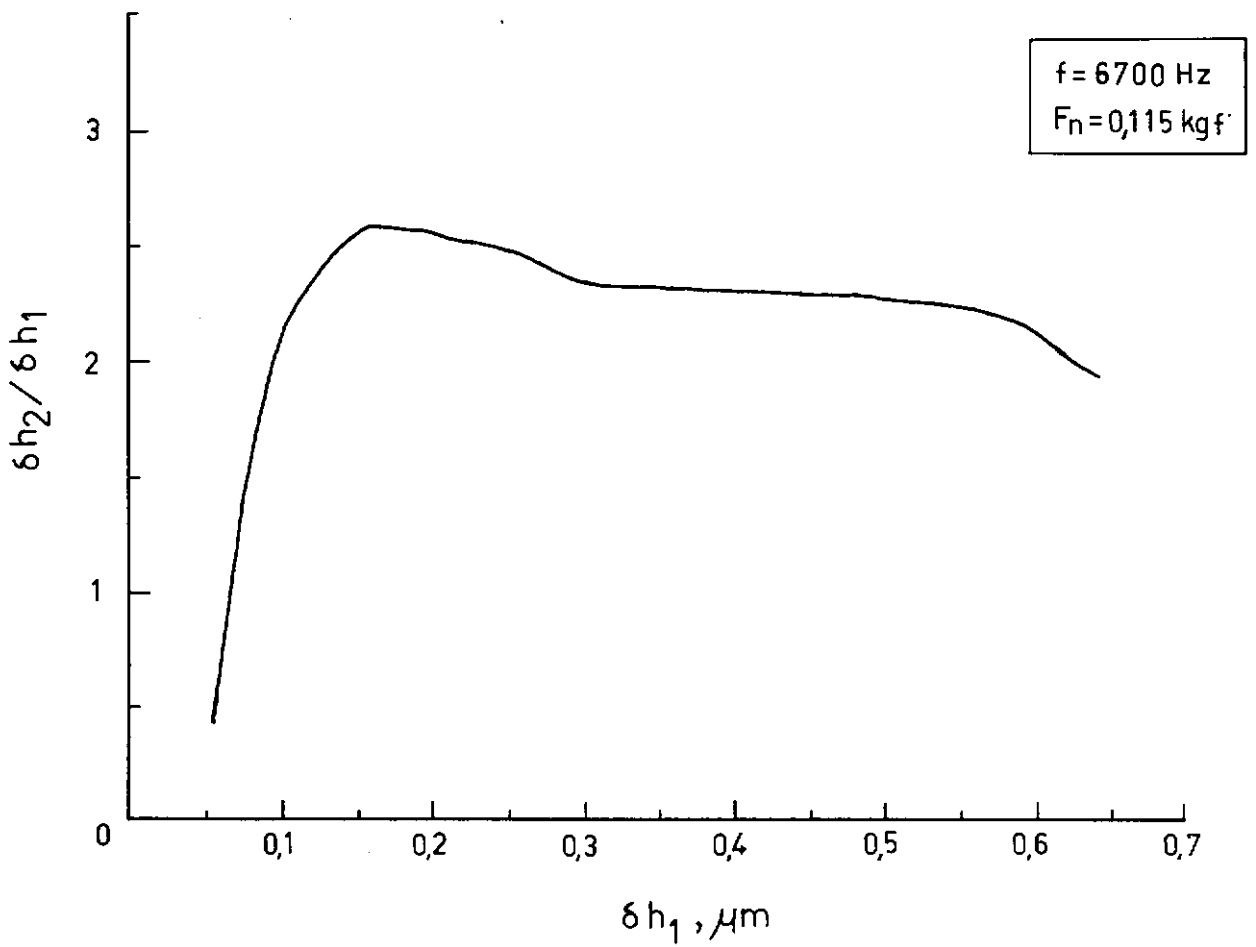


Gráfico II. Razão das amplitudes das placas superior e inferior versus amplitude da placa inferior.

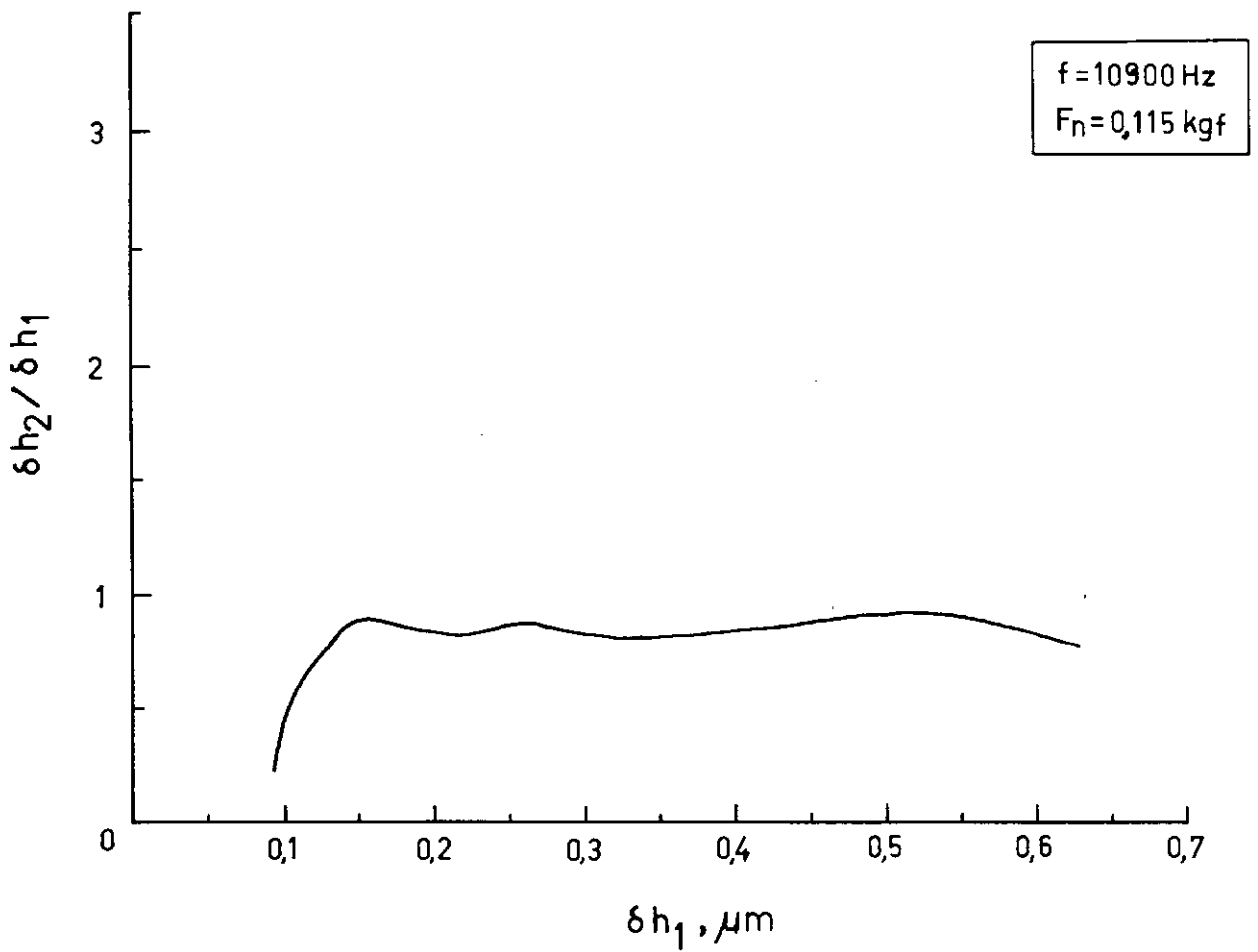


Gráfico III. Razão das amplitudes das placas superior e inferior versus amplitude da placa inferior.

tante, com oscilações, apesar do aumento da amplitude geradora até $0,4 \mu\text{m}$.

O Gráfico II, com frequência de 6700 Hz, mostra as mesmas tendências do Gráfico I, entretanto, o Gráfico III mostra valores mais baixos de amplitude alcançada pela placa superior sob frequência de 10900 Hz.

Esse fenômeno de estabilização da placa superior parece uma consequência da inércia da massa da placa e haste superiores sob as velocidades altas. Este conjunto superior é levantado periodicamente por forças de película comprimida mas desce por forças de gravitação, o que impede o conjunto de seguir as vibrações dinâmicas da placa inferior.

Nos testes executados para determinar as capacidades de carga da película comprimida sob várias frequências e excursões da placa inferior, a célula de carga foi montada acima do eixo, eliminando a possibilidade de ocorrência do fenômeno de estabilização da placa superior.

Os gráficos de capacidades de carga versus excursões são apresentados individualmente nos Gráficos IV a VI para os números de película de 1965, 8230 e 13390 respectivamente.

A capacidade de carga aumenta lentamente no início com pequenas excursões e à medida em que as excursões aumentam a

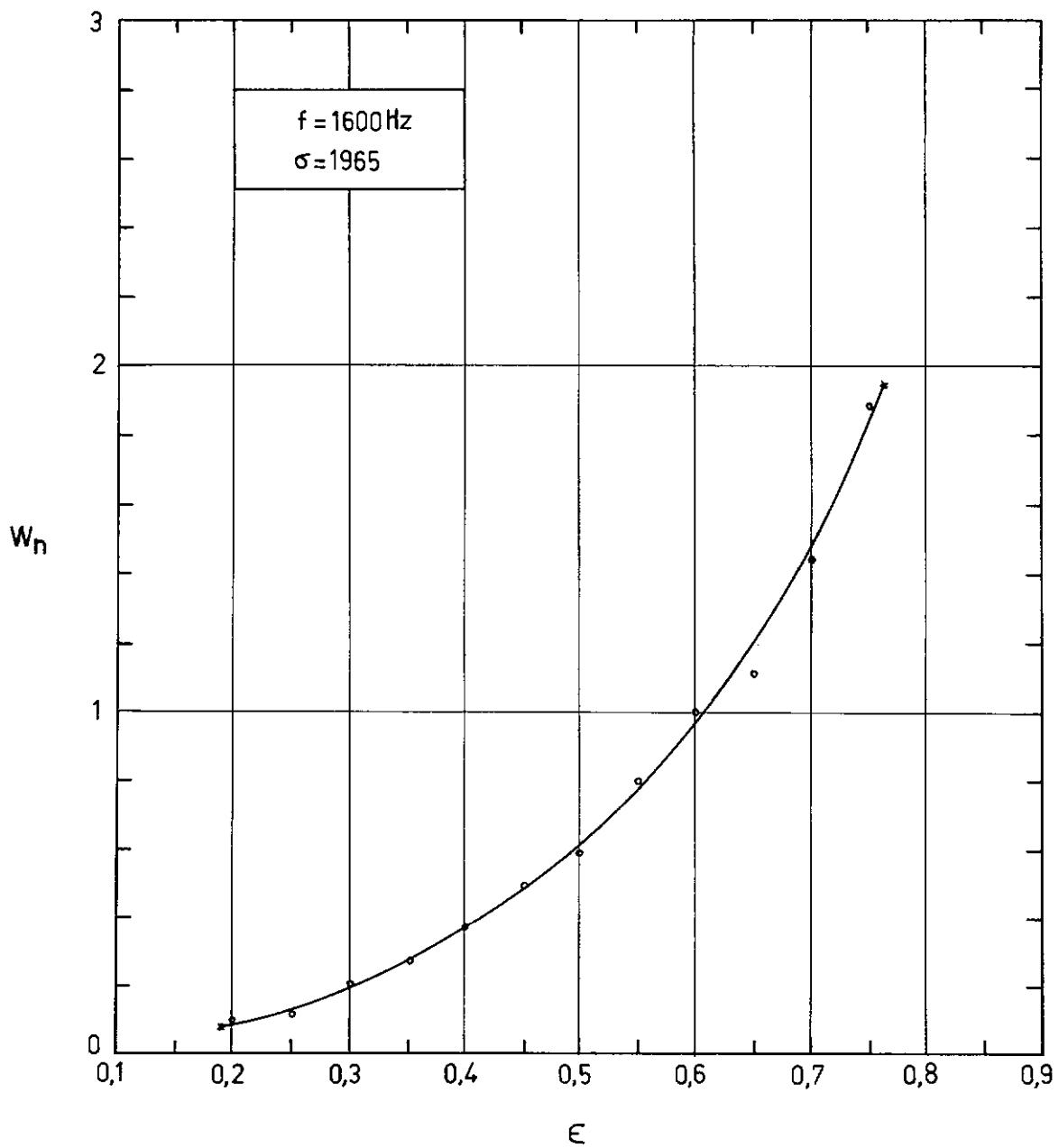


Gráfico IV. Carregamento suportado, W_n , versus excursão, ϵ .

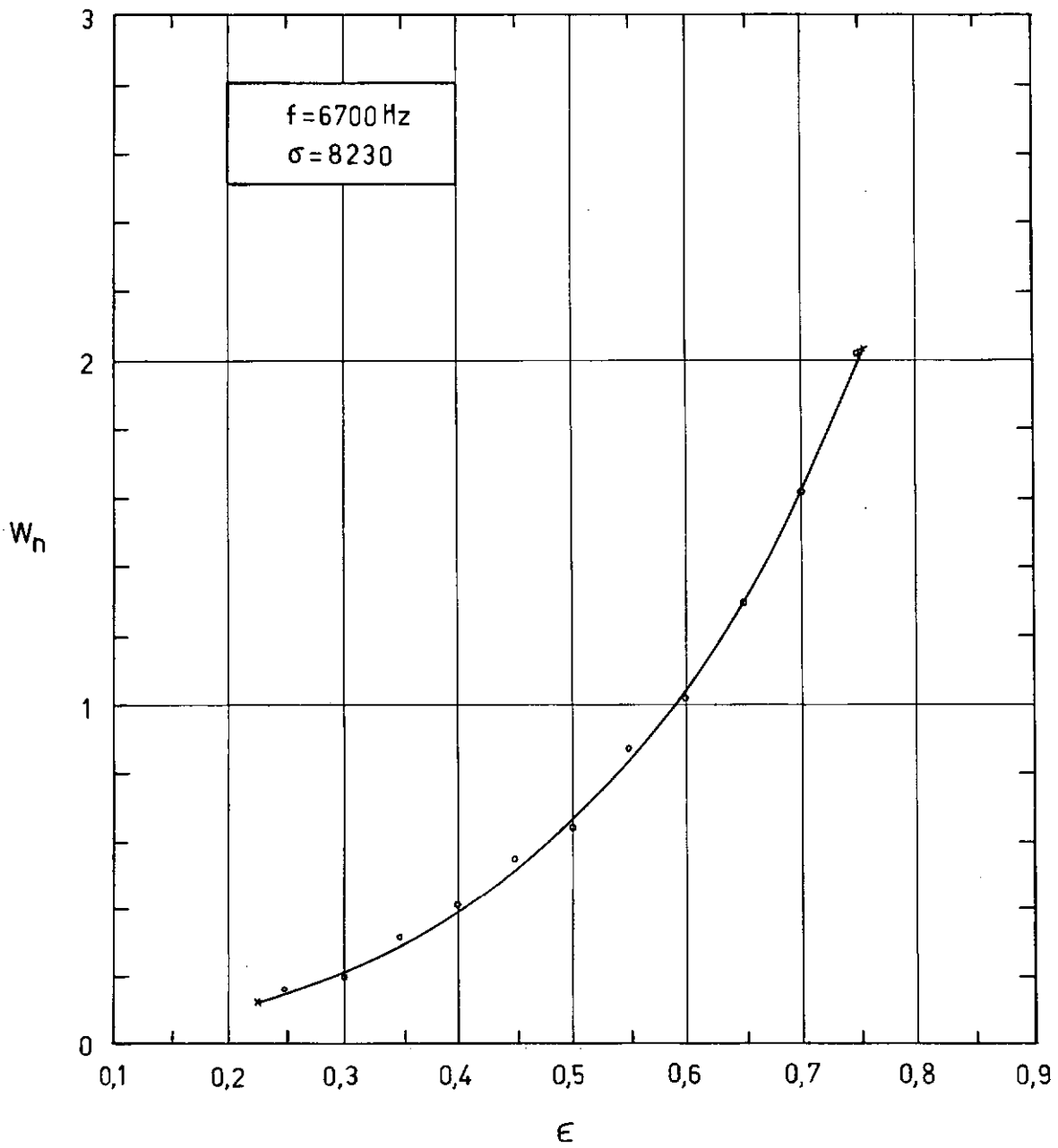


Gráfico V. Carregamento suportado, W_n , versus excursão, ϵ .

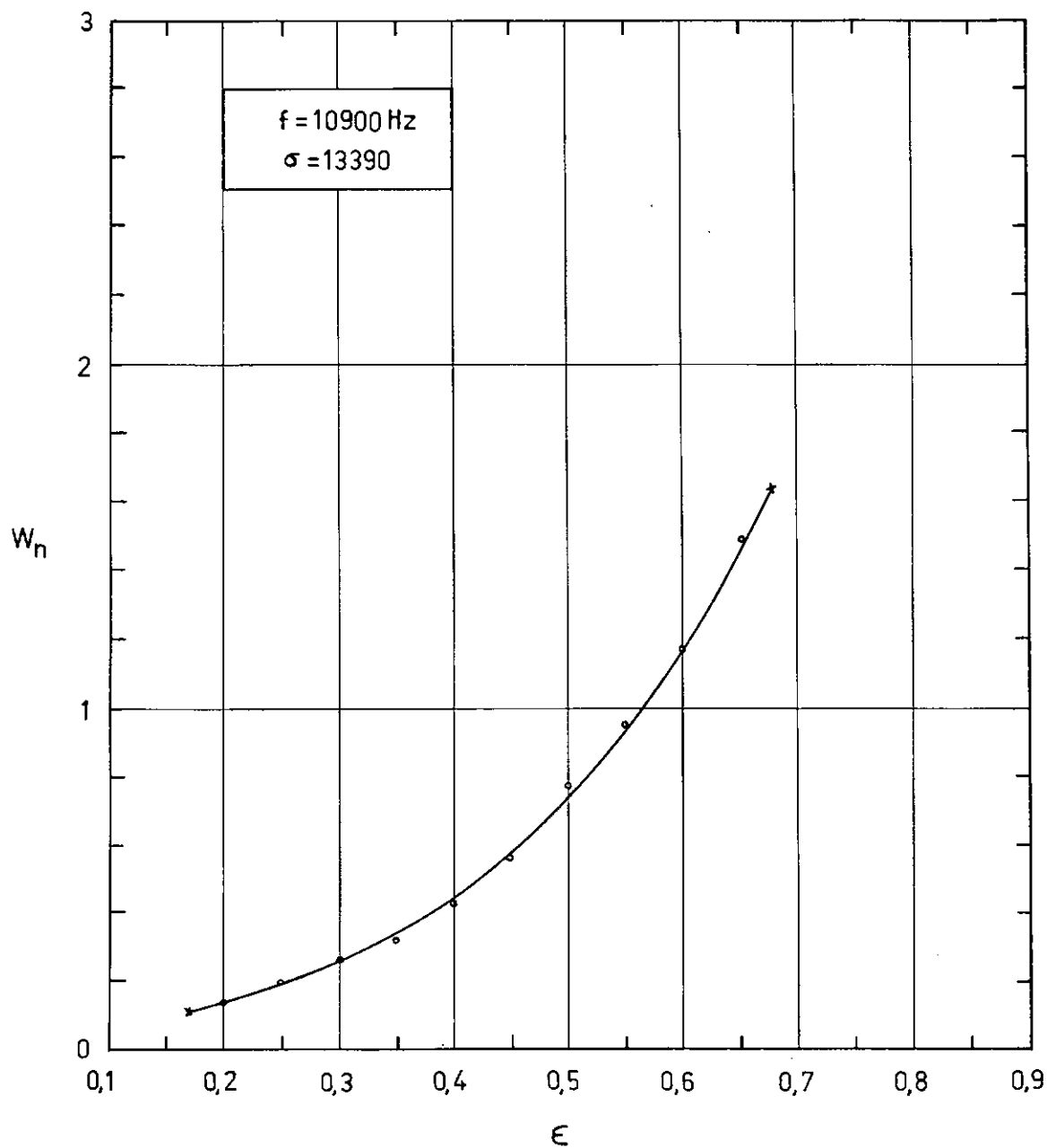


Gráfico VI. Carregamento suportado, W_n , versus excursão, ϵ .

capacidade de carga cresce rapidamente.

Teoricamente a capacidade de carga aumenta até um valor infinito antes que as duas placas se toquem, Gráfico VII. Este comportamento possui uma similaridade com o de mancais radiais ou axiais de lubrificação hidrodinâmica.

A rigidez do mancal de película comprimida é representada pelos gradientes da curva de capacidade de carga. No Gráfico IV o gradiente aumenta em torno de sete vezes quando ϵ aumenta de 0,2 até 0,75. Não foi possível continuar as medidas além de $\epsilon = 0,75$ porque ocorre frequentemente o contato entre as superfícies em espessuras tão pequenas de película, podendo levar à destruição das mesmas.

Nos Gráficos V e VI o comportamento é semelhante porém o ϵ é limitado a 0,65 no Gráfico VI.

No Gráfico VII as três curvas de capacidade de carga são apresentadas juntas para demonstrar o efeito do número de película sobre a capacidade de carga e comparar os resultados experimentais com a curva teórica assintótica, $\sigma \rightarrow \infty$.

Nas medições de capacidade de carga a amplitude da placa superior é igual à deformação no eixo axial do anel de força, ficando muito pequena comparada com a da placa inferior.

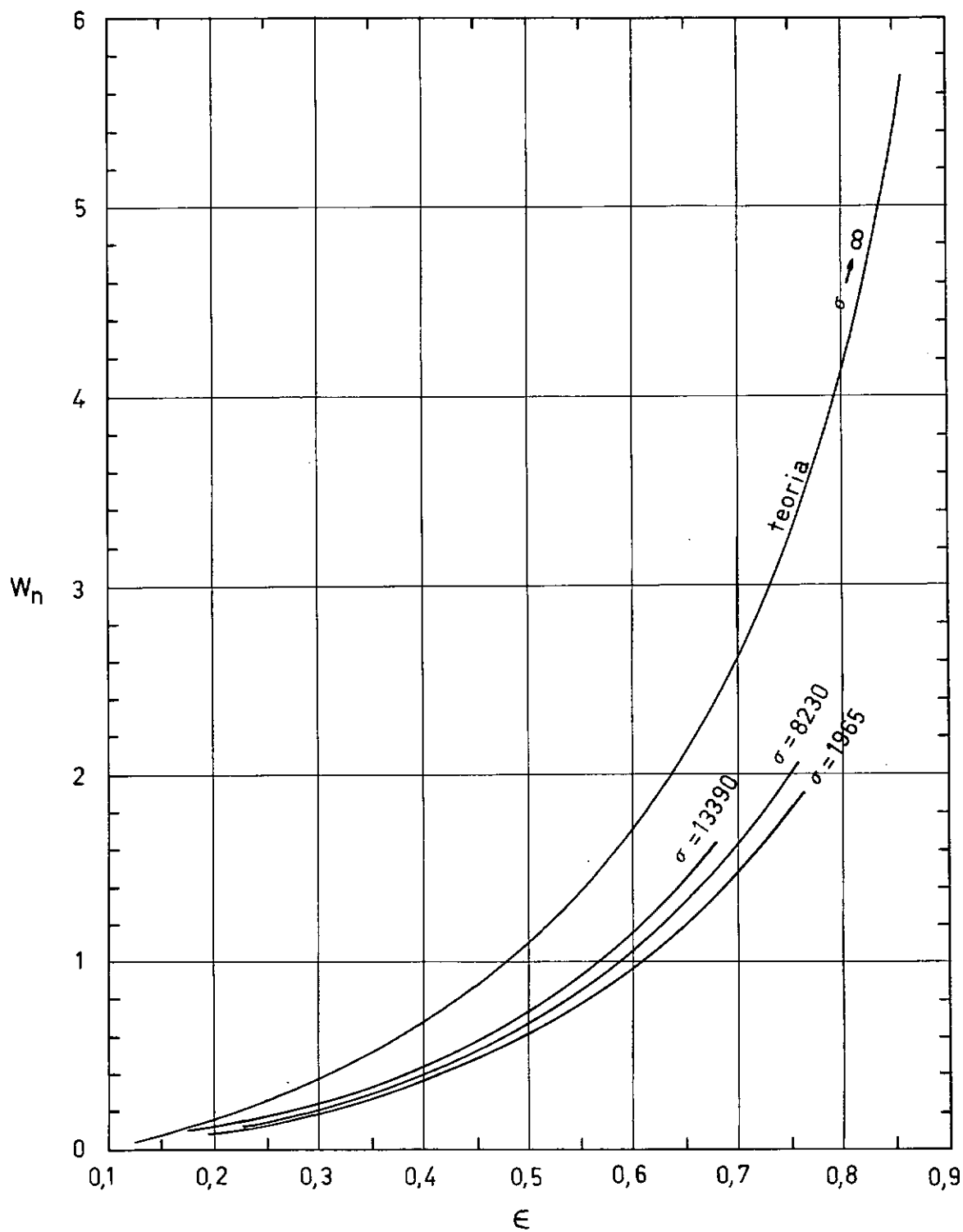


Gráfico VII. Carregamento suportado, W_n , versus excursão, ϵ .

No momento em que a espessura da película ficava igual a zero, quando as superfícies entravam em contato, a força indicada pela célula de força era aproximadamente senoidal enquanto que em operação com a película comprimida esta força era constante.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Duas placas planas e paralelas, vibrando na direção normal aos seus planos, expulsam o ar entre elas na fase de aproximação e sugam durante o afastamento. Este fenômeno de bombeamento torna-se num efeito de compressão do ar entre as placas quando as forças viscosas superam as do fluxo radial.

A película de ar entre as duas placas mantém uma pressão média superior à pressão do ambiente.

Um dispositivo capaz de reproduzir este fenômeno foi construído. O vibrador necessário para gerar o movimento foi construído usando-se elementos piezoelétricos em série para a obtenção de amplitudes suficientemente grandes. Instrumentos de controle e medição de vibração, aceleração, deslocamento e capacidade de carga foram incorporados no sistema.

Numa série de testes a energia da película comprimida foi transformada em energia cinética do conjunto superior. Este conjunto de placa e haste livres alcançou excursões da ordem de duas vezes e meia a excursão das placa vibradora. Num limite de frequência a massa do conjunto impede que ele possa continuar

seguindo a vibração e este se estabiliza num valor médio.

Numa outra série de testes a energia da película comprimida foi aproveitada para energia de deformação de um anel de força calibrado, mostrando que a capacidade de carga aumenta rapidamente com o aumento da excursão e ligeiramente com a frequência.

Os resultados obtidos experimentalmente confirmam a teoria e mostram que o mancal de película comprimida é capaz de suportar pequenas cargas. Carregamentos de até 4,2 kgf foram alcançados com um mancal axial de disco de 2,9 cm de diâmetro.

Uma análise do comportamento dinâmico da película comprimida, em uma faixa contínua de frequências, não foi possível devido à limitações do vibrador que impediram sua utilização como gerador do movimento normal relativo fora das frequências de ressonância. Esta análise fica como sugestão para trabalhos futuros.

Como aplicações possíveis do mancal de película comprimida podemos citar as situações em que se necessite de atrito muito baixo e a sustentação hidrodinâmica ou a pressurização externa não forem possíveis devido à falta de rotação constante ou suficiente ou ainda à impossibilidade da utilização de equipamento de compressão.

Podemos também usar mancais de película comprimida em lugar de mancais hidrostáticos, em pequenos carregamentos e sempre que o movimento oscilatório de uma das superfícies fôr possível.

BIBLIOGRAFIA

- (1) SALBU, E.O.J. - " Compressible Squeeze Films and Squeeze Bearings ", Journal of Basic Engineering, June 1964, p. 355.
- (2) TIPEI, N. - " Equatiile Lubrificatiei cu Gaze ", Comunicatile Acad. R. P. Romine, vol. 4, 1954 , p. 699 .
- (3) REINER, M. - " A Centripetal Pump Effect in Air ", Proc. 9th Congr. Appl. Mech., Brussel, vol. 1, 1958 , p. 424 .
- (4) TAYLOR, G.I. e SAFFMAN, P.G. - " Effects of Compressibility at Low Reynolds Numbers ", Journal Aero. Sci., vol. 24, 1957, p. 553 .
- (5) BECK, J.V., HOLLIDAY, W.G. e STRODTMAN, C.L. - " Experiment and Analysis of a Flat Disk Squeeze-Film Bearing Including Effects of Supported Mass Motion ", Journal of Lubrication Technology, January 1969 , p. 138 .
- (6) CAMERON, A. - " Basic Lubrication Theory ", Longman , 1970, p. 23-26 .
- (7) POWELL, J.W. - " Design of Aerostatic Bearings ", Machinery Publishing Co., 1970, p. 68-79.
- (8) BECKWITH, T.G. e BUCK, L. - " Mechanical Measurements ", 2nd Edition, Addison Wesley, 1969, p. 357-360.
- (9) HUETER, T.F. e BOLT, R.H. - " Sonics ", John Wiley & Sons, 1955.

- (10) JONES, E., YELON, W.B. e EDELMAN, S. - " Piezoelectric Shakers for Wide-Frequency Calibration of Vibration Pickups ", Journal of Acoust. Soc. America, vol. 45, nº 6, 1969, p. 1556 .
- (11) BRADFELD, G. - " Ultrasonic Transducers ", Ultrasonics, April 1970, p. 112 .

NOMENCLATURA

h	espessura do filme
h_0	espessura média do filme
δh	amplitude de deslocamento
k_{g0}	fator de pressão de mancal a ar = $(0,528 - p_a/p_0)/(1 - p_a/p_0)$
p	pressão
p_0	pressão inicial; pressão absoluta
p_a	pressão ambiente
q	fluxo por unidade de largura
q_x	fluxo na direção x por unidade de largura em y
q_y	fluxo na direção y por unidade de largura em x
r	raio (distância da origem)
r_0	raio do mancal de disco
t	tempo
u	velocidade de partícula na direção x
v	velocidade de partícula na direção y; volume
w	velocidade de partícula na direção z
x	coordenada na direção de U
y	coordenada na direção de V
z	coordenada através do filme
v_0	volume inicial
A	constante = PH
F	força
F_n	força média
P	pressão adimensional = p/p_0
H	espessura adimensional do filme = h/h_0
R	raio adimensional = r/r_0
T	tempo = ωt

U	velocidade de superfície na direção x
V	velocidade de superfície na direção y; volume = v/v_0
W	velocidade de superfície na direção z; carregamento
W_h	velocidade na direção de z da superfície superior
W_0	velocidade na direção de z da superfície inferior
W_n	carregamento médio
Z	impedância
ϵ	excursão = $\delta h/h_0$
η	viscosidade absoluta
θ	coordenada angular; ângulo de fase de deslocamento
ρ	densidade
σ	nº de película comprimida = $12 \eta \omega r_0^2 / p_a h_0^2$
ϕ	ângulo de fase entre força e deslocamento
Ω	resistência
ω	frequência circular
τ	tensão de cisalhamento
()	números entre parênteses, no texto, indicam referências

APÊNDICE I

CALIBRAÇÃO DAS CÉLULAS DE FORÇA

A calibração das células de força de strain gages foi feita com a célula montada no dispositivo de testes em posição invertida, isto é, a célula fixada na haste fica apoiada sobre a mesa do vibrador, sustentada lateralmente pelo mancal a ar externamente pressurizado e com o disco ótico para cima, Fig.I.1.

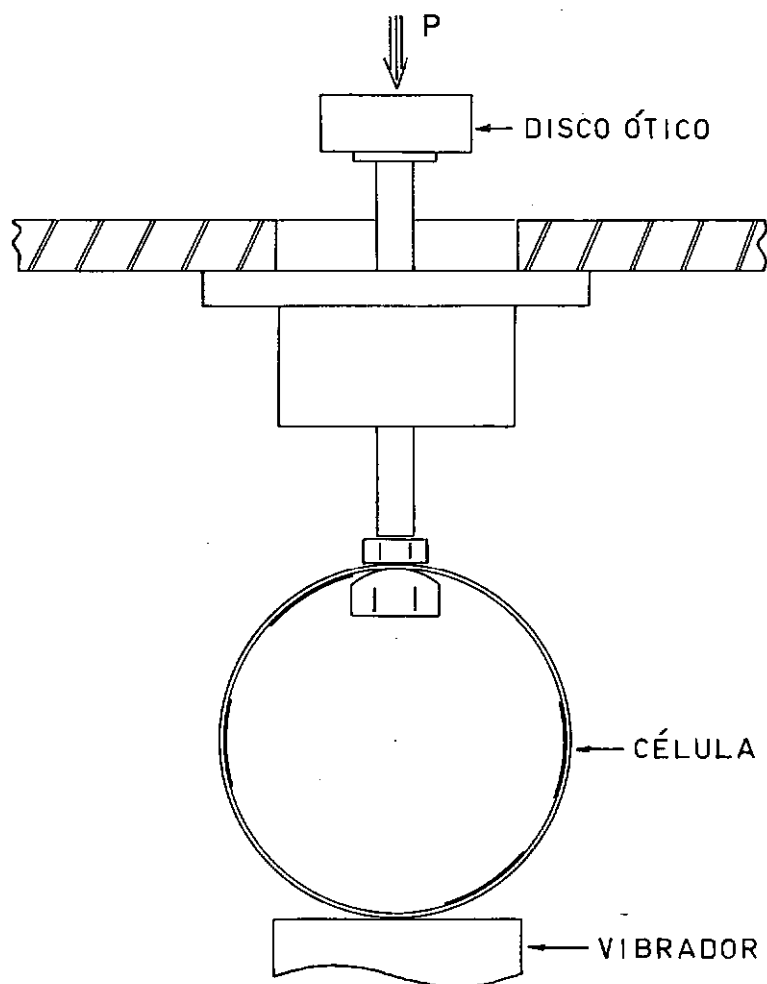
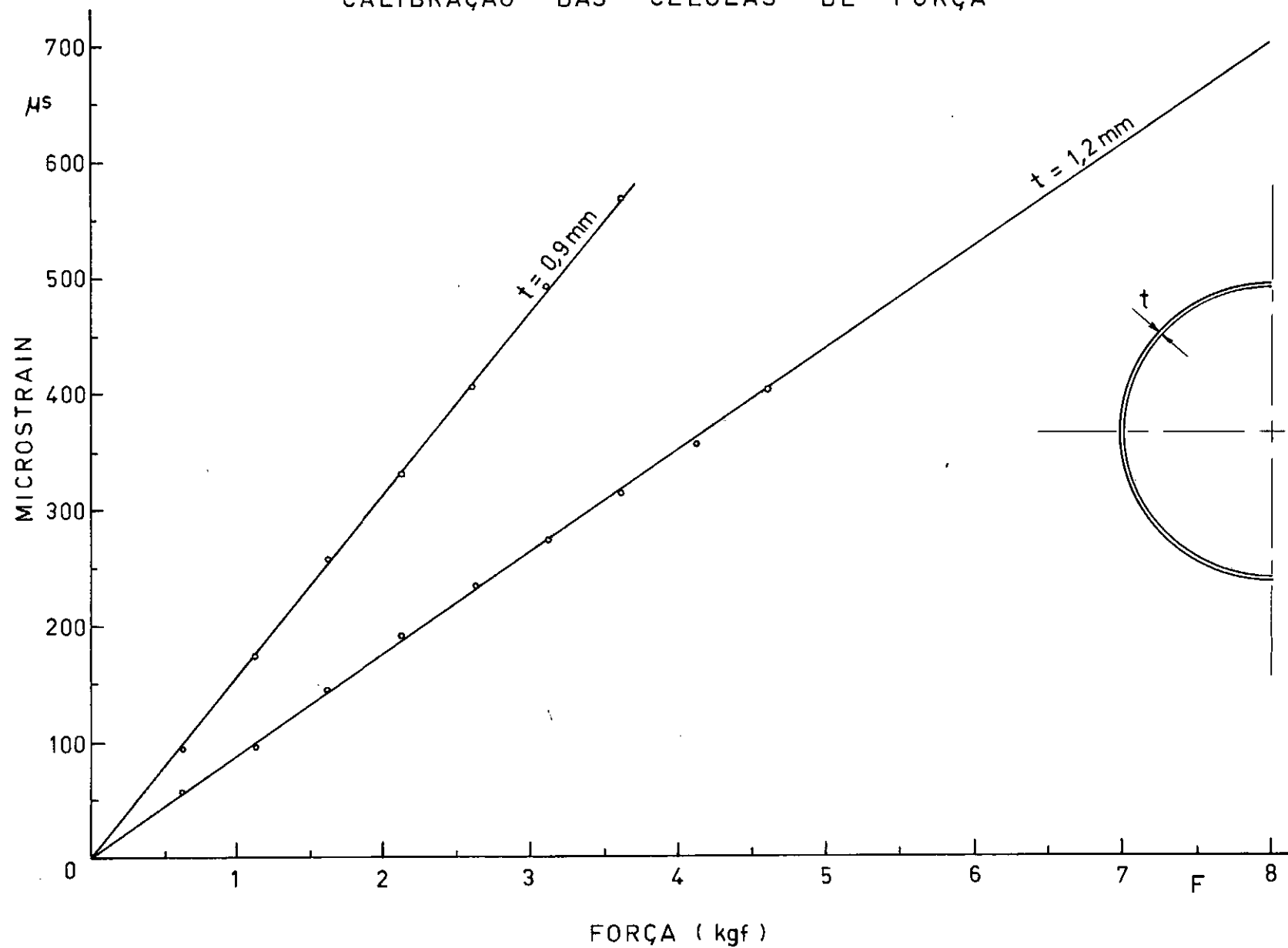


Fig. I.1 Posicionamento para calibração das células.

CALIBRAÇÃO DAS CÉLULAS DE FORÇA

Gráfico I.1



Colocando-se pesos conhecidos sobre o disco ótico, iniciando com 0,5 kg até um total de 3,5 kg para a célula de força de 0,9 mm e 4,5 kg para a de 1,2 mm, é feita a leitura em micro strain (deformação relativa em micro unid./unid.) no osciloscópio com a ponte (plug amplificador portador).

A influência do peso do disco ótico, da haste e das porcas, num total de 115 gramas, pode ser conhecida suspendendo-se o conjunto e fazendo-se a leitura inicial de referência com a célula separada do vibrador.

Os resultados das calibrações das duas células estão juntos no Gráfico I.1.

APÊNDICE II

PREVISÃO DAS FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA E CURVA DE RESPOSTA DO VIBRADOR

II.1- Previsão das frequências de ressonância.

No item 4.1.1 dissemos que o vibrador foi dimensionado para ressonância à 12000 Hz e por isso o seu comprimento é o de um quarto do comprimento de onda no alumínio para essa frequência. Esse dimensionamento feito inicialmente fornece, para o caso de barras não-uniformes, valores apenas aproximados. Um método mais exato consiste em tratar o vibrador como um sistema mecânico constituído de massas e molas (Fig. II.1) e calcular as frequências naturais numericamente.

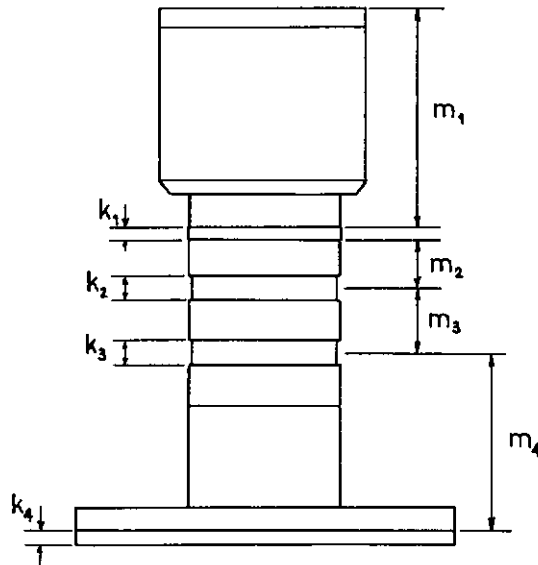


Fig. II.1 Vibrador dividido em massas e molas.

Isolando as massas da Fig. II.1, podemos escrever para cada uma a equação

$$m_i \ddot{x}_i - \sum F_{x_i} = 0, \quad i=1, n. \quad (\text{II.1})$$

Colocando as equações em forma matricial temos

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{x}_4 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 & 0 \\ -k_1 & (k_1 + k_2) & -k_2 & 0 \\ 0 & -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 \\ 0 & 0 & -k_3 & (k_3 + k_4) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{Bmatrix} = 0 \quad (\text{II.2})$$

ou $M \ddot{X} + K X = 0.$ (II.3)

Pré-multiplicando a equação (II.3) por M^{-1} obtemos

$$I \ddot{X} + A X = 0, \quad (\text{II.4})$$

onde $A = M^{-1} K$ (matriz dinâmica).

Assumindo movimento harmônico onde $\ddot{X} = -\lambda X$ e $\lambda = \omega^2$, a equação (II.4) se torna

$$[A - \lambda I] \{X\} = 0. \quad (\text{II.5})$$

Da equação (II.5) formamos o determinante

$$|A - \lambda I| = 0, \quad (\text{II.6})$$

o qual é a equação característica do sistema. As raízes λ_i da equação característica são denominadas autovalores e as frequên-

cias naturais do sistema são determinadas pela equação

$$\omega_i^2 = \lambda_i. \quad (\text{II.7})$$

Para o cálculo das frequências naturais a partir das matrizes de rigidez e de inércia foi desenvolvido um programa simples. Nele utilizamos a subrotina embutida NROOT para calcular os autovalores e autovetores de uma matriz real não-simétrica A, resultante de um produto de matrizes simétricas do tipo $M^{-1}K$ (matriz dinâmica). As frequências naturais são obtidas a partir dos autovalores pela equação (II.7).

PROGRAMA

```
C.....DETERMINACAO DAS FREQUENCIAS NATURAIS DE JM
C   TRANSDUTOR PIEZOELETRICO DO TIPO GERADOR ELETRODINAMICO....
    REAL K,M,XL,X,F
    DIMENSION K(10,10),M(10,10),XL(10),X(10,10),F(10)
    READ(8,10) N
    DO 1 I=1,N
C.....A MATRIZ K ESTA DIVIDIDA POR 1.0E10.....
  1  READ(8,20) (K(I,J),J=1,N)
    DO 2 I=1,N
  2  READ(8,20) (M(I,J),J=1,N)
    WRITE(5,40)
    DO 3 I=1,N
  3  WRITE(5,30) (K(I,J),J=1,N)
    WRITE(5,50)
    DO 4 I=1,N
  4  WRITE(5,30) (M(I,J),J=1,N)
    CALL ARRAY(2,N,N,10,10,K,K)
    CALL ARRAY(2,N,N,10,10,M,M)
C.....COMPUTAR AUTOVALORES E AUTOVETORES.....
    CALL NROOT(N,K,M,XL,X)
    CALL ARRAY(1,N,N,10,10,X,X)
C.....ESCREVER OS AUTOVALORES.....
    WRITE(5,60)
    WRITE(5,90) (XL(I),I=1,N)
C.....ESCREVER OS AUTOVETORES.....
    WRITE(5,70)
    DO 5 I=1,N
  5  WRITE(5,30) (X(I,J),J=1,N)
C.....COMPUTAR AS FREQUENCIAS NATURAIS.....
    PI=3.1415927
    DO 6 I=1,N
  6  F(I)=SQRT((1.0E10*XL(I))/(4*PI**2))
    WRITE(5,80)
    WRITE(5,90) (F(I),I=1,N)
C.....FORMATS PARA ENTRADA E SAIDA.....
 10  FORMAT(I3)
 20  FORMAT(6F10.5)
 30  FORMAT(6X,6F10.5)
 40  FORMAT(1H1,15X,'MATRIZ K (DIVIDIDA POR 1.0E10)')
 50  FORMAT(1H0,15X,'MATRIZ M')
 60  FORMAT(1H0,15X,'AUTOVALORES')
 70  FORMAT(1H0,15X,'AUTOVETORES')
 80  FORMAT(1H0,15X,'FREQUENCIAS NATURAIS')
 90  FORMAT(6X,6(E12.5,2X))
    CALL EXIT
    END
```

II.2- Resposta de frequências do vibrador.

Complementando os dados sobre o vibrador desenvolvidos para acionar a película comprimida de gás, mostramos no Gráfico II.1 a sua curva de resposta de frequências.

Os dados foram tomados com voltagem suficiente para atingir uma amplitude de $0,1 \mu\text{m}$.

Três ressonâncias principais são notadas nas frequências de 1600 Hz, 6700 Hz e 10900 Hz respectivamente, caracterizadas pelo decréscimo acentuado de voltagem.

A curva ideal para os propósitos desse trabalho deveria ser plana ou se caracterizar por arcos suaves com uniões arredondadas. No entanto, nota-se que as ressonâncias e anti-ressonâncias são bem destacadas. Alguma interferência entre as ressonâncias também é notada.

Isso é devido provavelmente aos múltiplos elementos que constituem o vibrador.

As características do vibrador limitaram a sua utilização às frequências de ressonância porque nas frequências intermediárias a necessidade de potência de acionamento é superior à disponível.

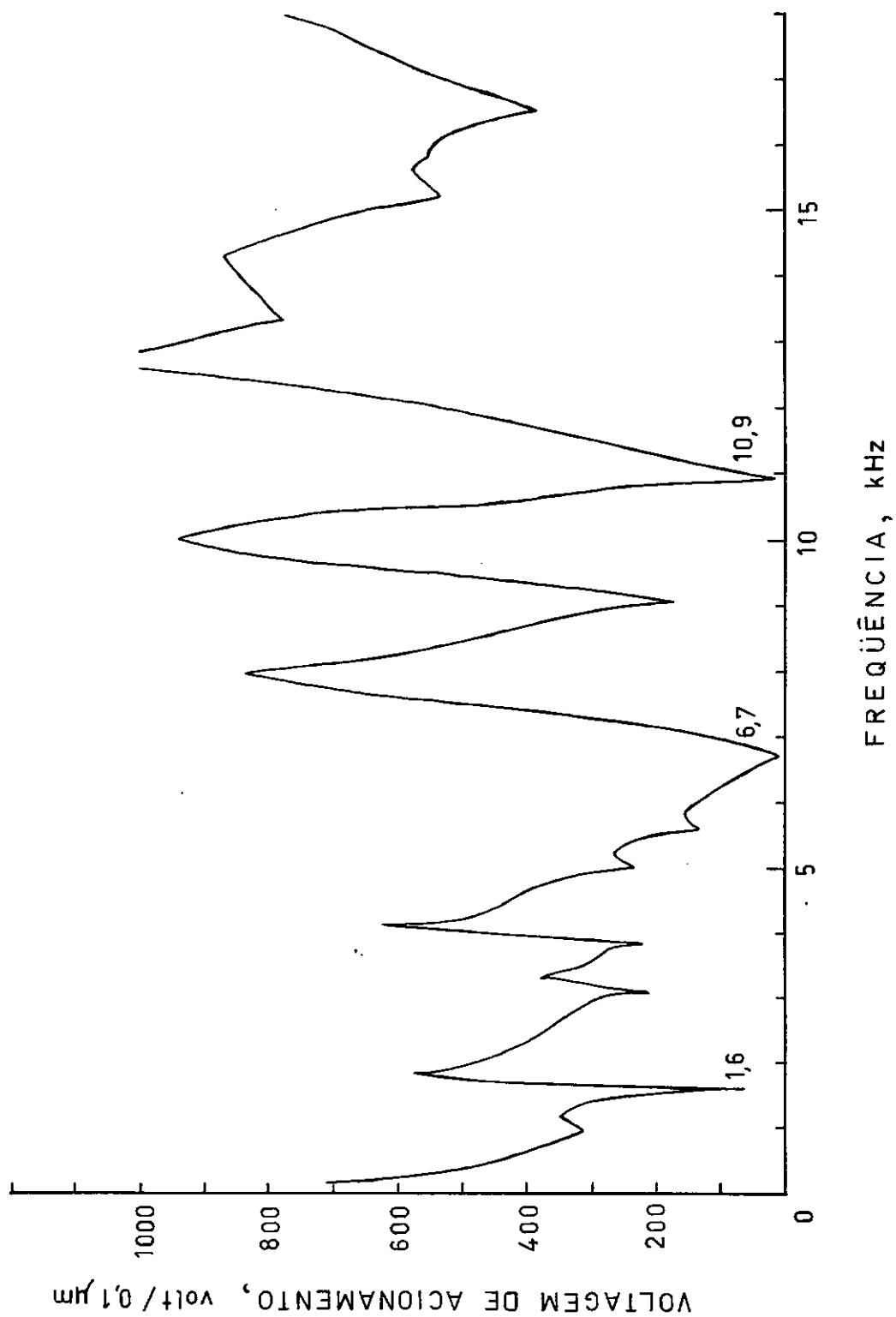


Gráfico II.1 Resposta de frequências do vibrador.

APÊNDICE III

MEDIÇÕES DE DESLOCAMENTO

III.1- Medição de deslocamento com acelerômetro.

A monitoração da amplitude de deslocamento da mesa do vibrador é feita por um acelerômetro.

O deslocamento é calculado, a partir da aceleração fornecida pelo voltímetro rms, pela equação:

$$D = \frac{\sqrt{2}}{S} A \cdot 9,807 \times 10^6 \cdot \frac{1}{(2\pi f)^2}, \quad (\text{III.1})$$

onde

D = amplitude de deslocamento (μm)

A = aceleração (mV rms)

S = sensibilidade do acelerômetro (mV/g) = 2,12

f = frequência (Hz).

III.2- Medição de deslocamento com transdutor capacitivo.

A sensibilidade do transdutor capacitivo à distância de 0,5 mm é igual a 0,9 V rms para um deslocamento pico a pico de 0,1 mm. Essa sensibilidade varia de modo inversamente proporcional ao quadrado da distância entre o eletrodo do transdutor e o espécime de teste.

$$\text{Ou} \quad \frac{S'}{S} = \frac{(d_0)^2}{(d'_0)^2}, \quad (\text{III.2})$$

onde S = sensibilidade à distância d_0
 S' = sensibilidade à distância d'_0 .

Na medida da amplitude do deslocamento da placa superior é necessário conhecer-se aproximadamente a posição média de oscilação da superfície utilizada para medição em relação ao eletrodo do transdutor.

Essa estimativa é feita pelo comparador eletrônico, possibilitando ajustar a distância d_0 para 1 mm (valor escolhido) acima da espessura média de película.

A sensibilidade nessa distância é de 0,45 mV rms para uma amplitude de deslocamento de $0,1\mu\text{m}$, aproximadamente linear (variação máxima de 0,3%) numa faixa de $\pm 1,5\mu\text{m}$ ($60\mu\text{in}$).